

修 士 学 位 論 文

駆動電流変調に基づく Ramsey-CPT 共鳴の励起法に関する研究

指導教授 五箇 繁善 准 教授

平成 28 年 2 月 18 日 提出

首都大学東京大学院

理工学研究科 電気電子工学 専攻

学修番号 14882304

氏 名 井出 拓美

学位論文要旨（修士（工学））

論文著者名 井出 拓美

論文題名：駆動電流変調に基づく Ramsey-CPT 共鳴の励起法に関する研究

本文

近年、Coherent Population Trapping (CPT) 共鳴と呼ばれる原子と光の相互作用を利用した超小型原子発振器が注目されている。この発振器は小型かつ低消費電力でありながら、現在普及している水晶発振器よりも高い周波数安定度を有する。しかし、スマートフォンなどの小型情報端末への搭載やトリリオンセンサへの応用を考えた場合、周波数安定度・体積・消費電力ともに更なる改善が要求されている。

周波数安定度において原子発振器で重要とされる短期安定度の性能は、共鳴の S/N 比と Q 値の積に比例する。 S/N 比は信号対雑音比を表し、光強度を高めることで改善可能である。一方、 Q 値は共鳴幅の細さを表すが、光強度を高めるとパワーブロードニング効果によって共鳴幅が増加し Q 値の低下を引き起こす。したがって、 S/N 比と Q 値を同時に改善するのは困難であった。

この問題の改善策の 1 つとしてパルス励起法が報告されている。パルス励起法はレーザをパルス化することで Ramsey-CPT 共鳴を発生させる方法である。パルスレーザを利用することでパワーブロードニング効果が抑制されるため、高い S/N 比を維持したまま Q 値を向上させることができ、短期安定度の大幅な改善が可能となる。しかし、従来のパルス励起法ではレーザのパルス化に音響光学変調器のような追加装置を必要とするため、それに伴う消費電力・体積の増加から超小型原子発振器への適用は困難であった。

そこで本研究では、パルス励起法を超小型原子発振器へ適用することを目指し、レーザの駆動電流変調のみでパルス化を行う方法を提案する。通常、駆動電流変調によりパルスレーザを生成した場合、レーザ出力光の ON/OFF 切り替えは可能であるが、レーザの内部温度変動に伴い出力波長に変動が生じる。したがって、必要な波長を出力するまでに時間を要するため、パルス励起法に駆動電流変調を適用することは困難であった。これに対し、提案法ではレーザに 2 段階電流パルスを入力することで解決をはかった。電流パルスの 1 段階目によりレーザを急激に加熱することで波長の立ち上がり時間を短縮し、続く 2 段階目の電流は

1 段目よりも小さい電流を入力することで必要な波長の維持を行った。

本論文では、提案手法を実験的アプローチから検証した。光源として垂直共振器面発光レーザ（VCSEL）を使用し、駆動電流変調により生成したパルスレーザを用いて Ramsey-CPT 共鳴の観測を行った。実験から S/N 比と Q 値を算出し、音響光学変調器を用いた観測結果との比較から本提案手法の有効性を評価した。

本論文は全 5 章で構成されている。

第 1 章は序論である。本研究の背景を示し目的を明確にする。

第 2 章は CPT 共鳴を利用した原子発振器について述べる。周波数安定度について説明し、原子発振器における周波数安定度の支配要因を示す。さらに本研究の基礎となる CPT 共鳴の原理とパルス励起法に関して詳述し、CPT 共鳴の励起に必要な 2 本のレーザを生成するための RF 変調について説明する。

第 3 章は駆動電流変調について述べる。2 段電流パルスを用いた出力波長の立ち上がり時間改善の手法や波長変動の推定方法を説明し、本提案手法を実現する装置構成を示す。波長変動の推定には透過光に現れる吸収線を利用した。駆動電流変調はレーザの出力波長が変動するため、RF 変調により生じたサイドバンドが影響し、透過光に複数の吸収線が観測される。レーザが照射されてから吸収線が現れるまでの時間を測定することで波長変動の推定を行った。

第 4 章は駆動電流変調を用いた Ramsey-CPT 共鳴の観測結果である。短期安定度に寄与する S/N 比と Q 値を、音響光学変調器を用いた結果と比較した。実験結果は通常の CPT 共鳴に比べ、音響光学変調器を用いた場合 S/N 比と Q 値の積が 7.6 倍向上したのに対し、本提案手法を用いた場合 7.2 倍向上し、ほぼ同等の性能改善が期待できる結果が得られた。

第 5 章は結論である。実験から得られた知見をまとめ、本研究の有効性について述べる。

目次

第 1 章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	2
1.2 研究目的.....	5
1.3 本論文の構成.....	5
第 2 章 CPT 原子発振器.....	7
2.1 まえがき.....	8
2.2 CPT 原子発振器の原理.....	8
2.3 周波数安定度.....	10
2.3.1 アラン標準偏差.....	10
2.3.2 短期安定度.....	11
2.3.3 長期安定度.....	12
2.4 Coherent Population Trapping 共鳴.....	14
2.4.1 CPT 共鳴（連続励起）.....	14
2.4.2 パルス励起.....	16
2.5 RF 変調.....	20
第 3 章 駆動電流変調.....	22
3.1 まえがき.....	23
3.2 駆動電流変調とは.....	23
3.3 1 段電流パルス.....	24
3.4 2 段電流パルス.....	28
3.5 波長変動の推定方法.....	33
3.6 装置構成.....	37
3.6.1 2 段電流パルス電流源.....	39
3.6.2 サンプルホールド回路.....	40
3.6.3 立ち上がり時間の制御.....	42
第 4 章 駆動電流変調による Ramsey-CPT 共鳴の観測結果.....	44
4.1 まえがき.....	45
4.2 Ramsey-CPT 共鳴のスペクトル.....	45

4.2.1 1 段電流パルス	45
4.2.2 2 段電流パルス	47
4.3 音響光学変調器との比較	48
4.3.1 半値全幅と共鳴スペクトル	48
4.3.2 コントラスト	51
4.3.3 性能指数	54
第 5 章 結論	56
5.1 研究成果	57
5.2 今後の展望	57
参考文献	58
付録 FPGA プログラム	62
業績	66
謝辞	67

第1章 序論

1.1 研究背景

近年、パソコンやスマートフォンなどの通信機器の急速な普及に伴い、情報通信量が飛躍的に増加している。そのため、高速データ通信や通信周波数帯域の有効利用など通信技術に対する要求の高まりから、発振器の周波数安定度向上が求められている。また、優れた周波数安定度を持つ発振器は GPS 機能の向上やセンサ技術の高精度化など様々な分野に応用することができ、小型機器への搭載に向け発振器の高安定化・小型化・低消費電力化に向けた研究が行われている。

現在、安価で大量生産が可能な発振器として水晶発振器が広く普及している。しかし、その周波数安定度はスマートフォンに搭載されている温度補償水晶発振器 (TCXO) が 10^{-6} 程度であり、大型な物でも恒温槽付水晶発振器 (OCXO) の 10^{-10} 程度が限界である。したがって、更なる周波数安定度の向上には水晶発振器に代わる新たな発振器が必要となる。

一方、原子の共鳴周波数を利用した原子発振器は水晶発振器に比べ数桁高い周波数安定度を実現しており、原子発振器の 1 つである水素メーザ (H-maser) では 10^{-15} を達成している。ところが、原子発振器はマイクロ波共振器を用いるため、装置が大型となり消費電力が高い。一般に発振器は周波数安定度が高いほど消費電力が増加する傾向にあり (図 1.1)、高安定な原子発振器は小型情報端末への搭載が困難であった。

そこで、Coherent Population Trapping (以下 CPT) 共鳴[1]を利用した小型原子発振器 (CSAC : Chip-Scale Atomic Clock) が期待されている。CPT 共鳴は原子と光の相互作用による量子干渉現象であり、原子にレーザ光を照射することでマイクロ波遷移を検出することができる[2][3]。したがって、従来の原子発振器に不可欠であったマイクロ波共振器が不要となり、小型で低電力動作可

能な原子発振器の製造が可能となる[4]。2011 年には CPT 共鳴を利用した小型原子発振器としてアメリカの Microsemi 社（旧 Symmetricom 社）から SA.45s が発売された（図 1.2）。その性能は体積 16.8 cm^3 、消費電力 125 mW 、周波数安定度 3×10^{-10} /月であり、小型ながらも水晶発振器よりも高い周波数安定度を実現している。しかし、小型情報端末への搭載やトリリオンセンサへの応用を考えた場合、周波数安定度・体積・消費電力の更なる改善が要求されている。

一般に周波数安定度はアラン標準偏差で表される[6]-[8]。原子発振器の周波数安定度は、アラン標準偏差の平均化時間により短期安定度と長期安定度の 2 つに分類され[9]、それぞれ性能の制限要因が異なる。

短期安定度の性能は共鳴の SN 比と Q 値の積に依存する[10]。SN 比は信号対雑音比を表し、CPT 共鳴の場合コントラストと呼ばれる指標で評価される。コントラストは共鳴振幅を背景光強度で割った値として定義され[11]、 Q 値は共鳴の細さを表す指標である。コントラストを改善するためには、高い光強度で原子を励起し CPT 状態の原子を増加させる必要があるが、高い光強度はパワーブロードニングによる Q 値の低下を引き起こす[12]。したがって、コントラストと Q 値を同時に改善することは困難であった。

一方、長期安定度の性能は周波数シフトにより制限される。周波数シフトとは、共鳴の測定条件が時間的に変化し共鳴周波数が変動することを表す。周波数シフトの主要因の 1 つは光強度の変動によって生じるライトシフトである。したがって、周波数安定度の改善には、コントラストと Q 値の積の向上とライトシフトの低減が必要となる。

近年、パルス励起による周波数安定度の改善が注目されている[13]-[17]。パルス励起は、ラムゼイ干渉を利用する方法で、パワーブロードニング効果を抑制するため、 Q 値の向上による短期安定度の改善が可能である。加えて、ライトシ

フトの低減効果があるため、長期安定度も改善される[18]。しかし、これまでの研究ではパルス励起に必要なレーザパルスの生成に音響光学変調器を使用しており、体積と消費電力が増加してしまう課題があった。そのため、パルス励起を小型原子発振器へ適用することが困難であった。

そこで本研究では、小型原子発振器の周波数安定度改善を目指し、小型かつ低電力動作可能なパルス励起法として、駆動電流変調によるレーザパルス化の検討を行った。駆動電流変調は電流制御以外に特別な装置を必要としないため、体積・消費電力を増加させずに小型原子発振器に適用することが可能となる。しかし、駆動電流変調を用いてパルス化を行った場合、レーザの ON/OFF を直接切り替えるため、再び必要な波長を出力するまでに時間を要し、パルス励起の観測が困難であった。この問題を解決するため、本論文では 2 段電流パルスによる駆動電流変調方式を提案する。

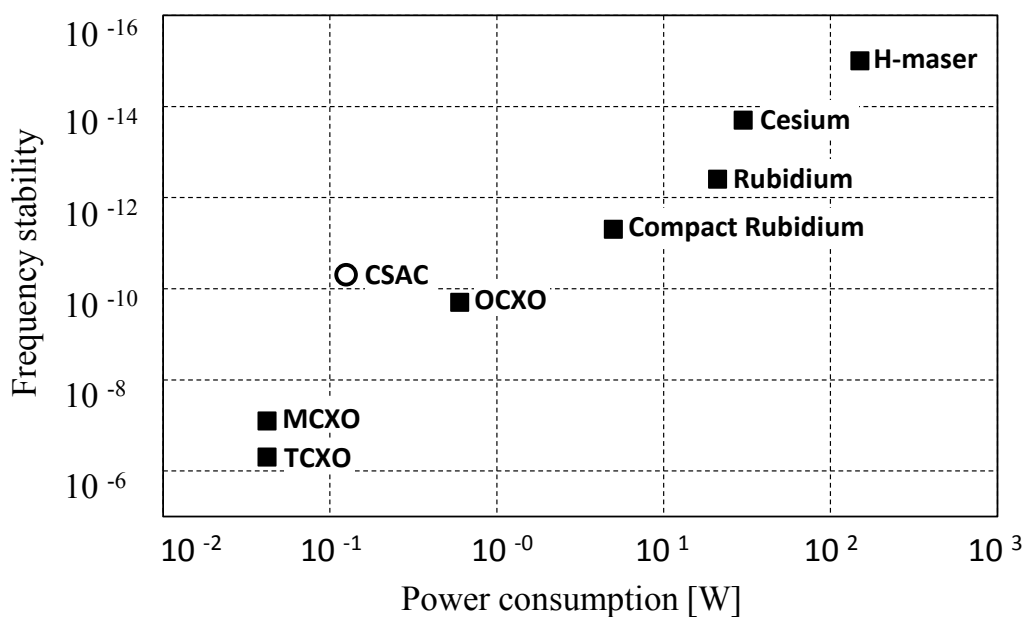


図 1.1 各発振器の消費電力対周波数安定度の分布



図 1.2 Microsemi 社製 SA.45s CSAC (文献[5]より引用)

1.2 研究目的

本研究では優れた周波数安定度を持つ小型原子発振器の実現に向け、小型かつ低電力動作可能なパルス励起法を提案し、その有効性を検証することを目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文は全 5 章から構成される。

第 1 章は序論である。本研究の位置づけおよび論文の構成を示す。

第 2 章は CPT 共鳴を利用した小型原子発振器について述べる。CPT 原子発振器の原理を示し、発振器の周波数安定度について説明する。さらに、CPT 共

鳴の原理を述べ、周波数安定度の改善が可能となるパルス励起について詳述する。加えて、CPT 共鳴の励起に必要となる 2 本のレーザを生成するための RF 変調について説明する。

第 3 章は本論文で提案する駆動電流変調について述べる。レーザに電流パルスを入力した際の透過光の様相を観測し、透過光から出力波長の変動を算出した。さらに、波長の立ち上がり時間が短縮可能となる 2 段電流パルスによる駆動電流変調について説明し、本提案手法を実現するための装置構成を示す。

第 4 章は駆動電流変調を用いた Ramsey-CPT 共鳴の観測結果について述べる。2 段電流パルスによる駆動電流変調によって、Ramsey-CPT 共鳴が観測可能であることを示す。さらに、提案手法の有効性を示すため、音響光学変調器との比較を行った。比較項目として、各手法におけるコントラスト・半値全幅・性能指数の自由発展時間に対する特性を評価した。実験結果から音響光学変調器と同等の短期安定度改善効果があることが明らかとなった。

第 5 章は結論である。本研究で得られた知見をまとめ、成果を報告する。

第2章 CPT 原子発振器

2.1 まえがき

本章では、CPT 共鳴を利用した原子発振器について詳述する。最初に CPT 原子発振器の原理を示す。次に発振器の評価指標となる周波数安定度について述べ、CPT 共鳴と周波数安定度の関係を明確にする。さらに、CPT 共鳴の原理を説明し、周波数安定度の改善が可能なパルス励起について詳述する。加えて、CPT 共鳴の励起に必要な 2 本のレーザを生成する方法として RF 変調について述べる。

2.2 CPT 原子発振器の原理

CPT 共鳴を用いた原子発振器は、アルカリ原子の共鳴周波数を利用することで高い周波数安定度を維持している。CPT 原子発振器の構成を図 2.1 に示す。局部発振器の出力信号をマイクロ波シンセサイザに合成し、原子発振器の主要部に入力する（図 2.2）。このとき、マイクロ波シンセサイザの出力周波数はアルカリ原子の基底準位間の周波数差に合わせるため、数 GHz の高周波（RF）となる。主要部は主に、励起用レーザとアルカリ原子が封入されたガスセル、そして透過光を検出するためのフォトディテクターで構成されている。励起用レーザは一般に垂直共振器面発光レーザ（Vertical Cavity Surface Emitting LASER：以下 VCSEL）が使用され、マイクロ波シンセサイザから入力される RF 信号により変調される。変調されたレーザ光をアルカリ原子に照射することで CPT 共鳴と呼ばれる現象が発生し、主要部に入力された周波数と原子の共鳴周波数との差を、ガスセルを透過する光の強度として検出することができる。透過光強度はレーザの変調周波数が共鳴周波数に一致したときに最大となり、共鳴周波数からのずれに応じて減少する。この透過光強度をフォトディテクター

によって検知し、常に光強度が最大となるよう制御装置を介して局部発振器にフィードバックする。マイクロ波シンセサイザの出力周波数が共鳴周波数に一致するよう局部発振器を制御することで、局部発振器の周波数安定度を高めている。

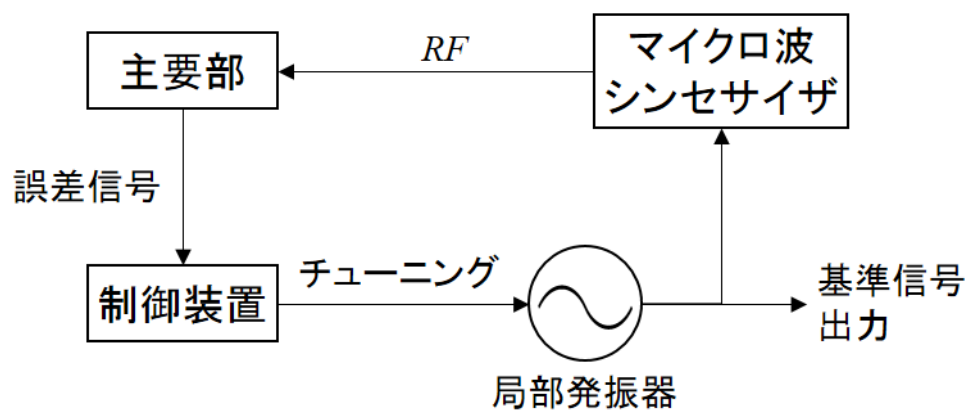


図 2.1 CPT 原子発振器の回路構成

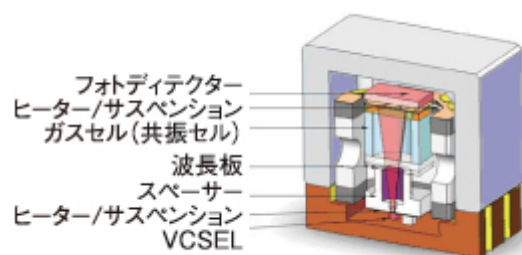


図 2.2 CPT 原子発振器の主要部（文献[19]より引用）

2.3 周波数安定度

2.3.1 アラン標準偏差

周波数安定度は発振器の周波数変動特性を評価する指標の1つで、一般にアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau)$ によって評価される[6][7][8]。以下にアラン標準偏差の求め方を示す。

発振器の出力周波数の公称値を f 、公称値からの周波数のずれを f' とする。公称値からの規格化した周波数のずれは瞬時周波数オフセットと呼ばれ、 $y(t)$ と定義すると以下のように表される。

$$y(t) = \frac{f'}{f} \quad (2.1)$$

この瞬時周波数オフセット $y(t)$ を平均化時間 τ で平均をとると任意のサンプル \bar{y}_k は以下の式で表される。

$$\bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} y(t) dt \quad (2.2)$$

$y(t)$ と \bar{y}_k の関係を図 2.3 に示す。平均化時間 τ で平均した \bar{y}_k の周波数変動の分散はアラン分散と呼ばれ、以下の式で定義される。

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 \quad (2.3)$$

ここで M はサンプル数を表す。アラン分散の平方根をとった $\sigma_y(\tau)$ がアラン標準偏差である。したがって、アラン標準偏差は平均化時間 τ の関数として得られ、 $\sigma_y(\tau)$ が低いほど優れた安定度を意味する。

2.3.2 短期安定度

原子発振器の周波数安定度は、上述の平均化時間 τ により短期安定度と長期安定度の 2 つに分類される[9]。平均化時間の短い周波数安定度を表す短期安定度のアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau)$ は以下の式に従うことが知られている[18]。

$$\sigma_y(\tau) \propto \frac{1}{Q \cdot (S/N)} \tau^{-\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

ここで、 Q は Q 値を示し、 S/N は SN 比を表す。 Q 値は共鳴の細さを表す指標であり、共鳴周波数 f_0 と半値全幅 Δf を用いて以下の式で定義される。

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (2.5)$$

したがって、半値全幅が小さいほど Q 値が向上する。一方、SN 比はシグナル/ノイズで定義され、CPT 共鳴の場合コントラストと呼ばれる指標で表される(図 2.4)。コントラストは以下のように定義される。

$$\text{Contrast}(\%) = \frac{\text{Signal}}{\text{DC level}} \times 100 \quad (2.6)$$

Signal は CPT 共鳴の振幅を表し、DC level は CPT 共鳴に寄与しない背景光の強度に比例する。通常、CPT 共鳴の観測にはレーザを RF 変調することで生成される 2 つの 1 次のサイドバンドを利用するが、RF 変調は同時に高次のサイドバンドも生成する。キャリアと高次のサイドバンドは原子に吸収されずにガスセルを透過するため、DC level 上昇の要因となる。

短期安定度の性能は Q 値とコントラストの積で決まるため、性能指数を以下のように定義する。

$$\text{性能指数} = Q \cdot \text{Contrast} \quad (2.7)$$

短期安定度の改善には、 Q 値とコントラストを同時に改善し、性能指数を向上させる必要がある。

2.3.3 長期安定度

平均化時間が長いときの周波数安定度を長期安定度と呼ぶ。長期安定度は周波数シフトによって性能が制限される[9]。周波数シフトは測定条件が時間的に変化することで共鳴周波数が変動する現象であり、CPT 原子発振器における周波数シフトの要因は、ゼーマンシフト、バッファガスシフト、ライトシフトの3つである。

ゼーマンシフトは静磁場によって生じる周波数シフトである[20]。磁場を印加しない場合、複数の磁気副準位が縮退し各共鳴が重なって観測される。縮退を解き時計遷移を選別するためには静磁場を印加する必要があるが、時計遷移の磁気副準位も静磁場によりシフトするため、周波数シフトの要因となる。

バッファガスシフトはアルカリ原子と一緒に封入するバッファガスの圧力によって生じる周波数シフトである[21]。バッファガスは緩衝気体と呼ばれ、アルゴンやネオンなどの不活性ガスや窒素ガスを封入することで、アルカリ原子の壁面衝突による緩和を抑制し Q 値を向上させる効果がある。しかし、同時に圧力効果と呼ばれるバッファガスの圧力に比例した周波数シフトを引き起こす。

ライトシフトはレーザの光強度に起因する周波数シフトである。原子がレーザ光と相互作用し、エネルギー準位がシフトすることによって周波数シフトが引き起こされる[22][23][24]。CPT 共鳴の場合、ライトシフトは光強度に対し線形に増加する。

周波数シフトにおいて、ゼーマンシフトは時計遷移のシフト量が小さい領域の静磁場を印加することで改善可能である。したがって、長期安定度劣化の主要因は、バッファガスシフトとライトシフトの2つであり、長期安定度の改善にはバッファガスシフトとライトシフトの抑制が要求される。

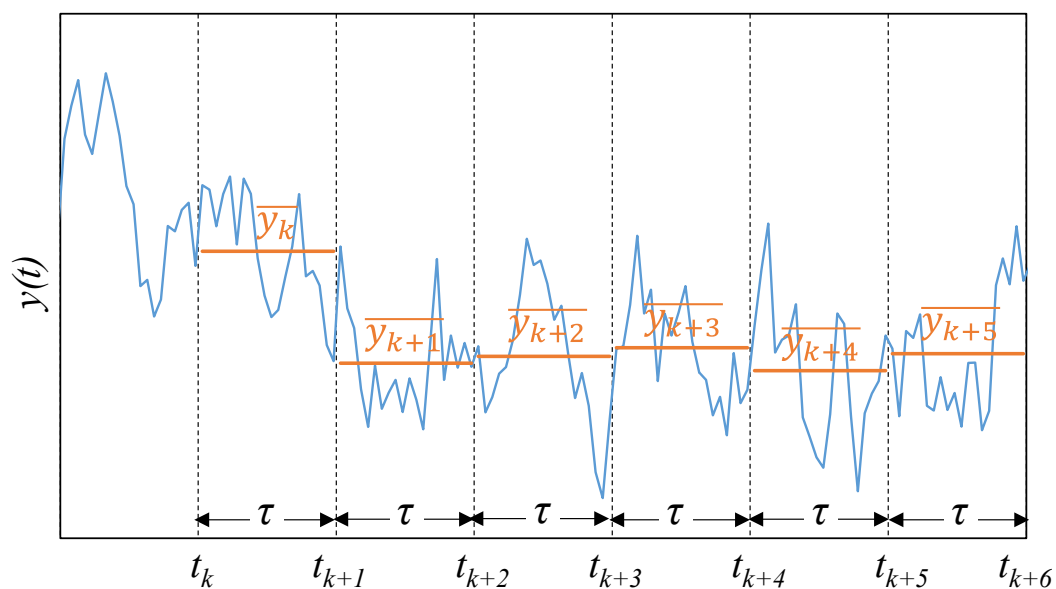


図 2.3 発振器の周波数変動例

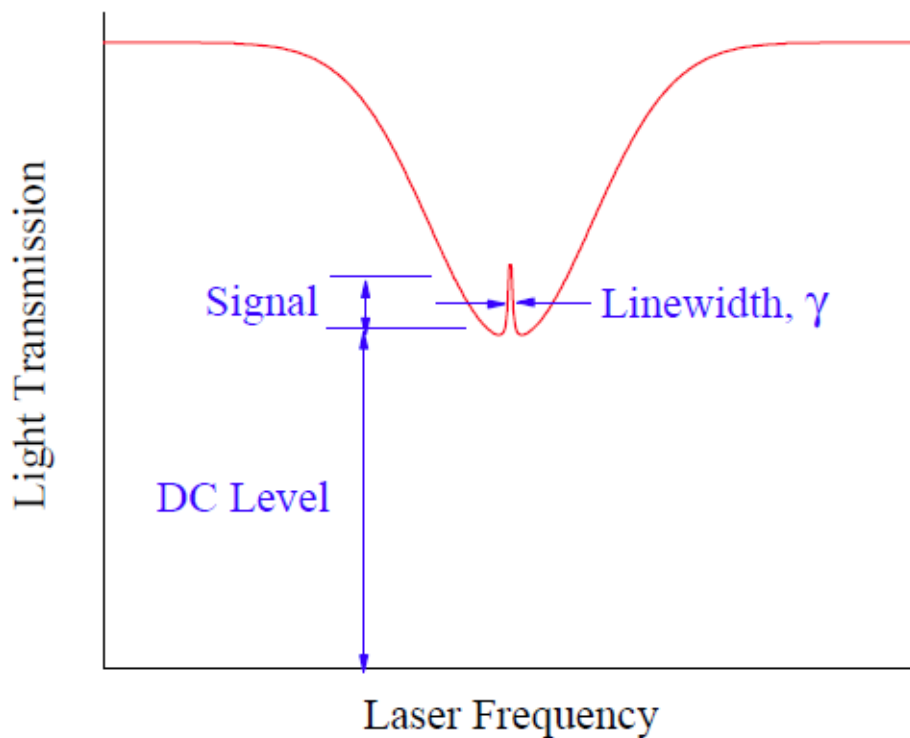


図 2.4 CPT 共鳴のコントラスト (文献[11]より引用)

2.4 Coherent Population Trapping 共鳴

2.4.1 CPT 共鳴（連続励起）

CPT 共鳴は 2 つの基底準位から共通の励起準位へ同時に励起させることで生じる量子干渉現象である。図 2.5 に CPT の励起構造を表す Λ 型 III 準位系を示す。 $|1\rangle$ と $|2\rangle$ は 2 つの基底準位であり、 $|3\rangle$ は励起準位を示す。通常、レーザの周波数が基底準位と励起準位の間の遷移周波数に一致したとき、原子は光を吸収し透過光強度が減少する。ところが、2 本のレーザを用いて 2 つの基底準位から共通の励起準位へ同時に励起させた場合、原子は光を吸収せず透過光強度が増加する透明化現象が起こる。このとき、2 本のレーザの周波数差が基底準位間の周波数差 f_{12} に一致したとき透過光強度が最大となる鋭いスペクトルが観測される。この現象を CPT 共鳴と呼び、後述するパルス励起に対応し、通常の CPT 共鳴の励起法を連続励起と呼ぶ。CPT 共鳴は励起用レーザを直接変調し、アルカリ原子が封入されたガスセルに照射することで観測できる。そのため、従来の小型原子発振器に必要なマイクロ波共振器を用いずに原子の共鳴周波数が検出でき、装置の小型化が可能となる。

CPT 共鳴の周波数安定度を改善するには、コントラストと Q 値の積の向上とライトシフトの抑制が必要となる。コントラストは共鳴振幅を増加させることで改善が可能であり、共鳴振幅は励起用レーザの光強度を高め、相互作用する原子の数を増やすことで増加する。しかし、光強度を高めると、パワーブロードニング効果によって共鳴幅が増加し Q 値の低下を引き起こす。したがって CPT 共鳴の Q 値とコントラストを同時に改善するのは困難であった。また、ライトシフトは光強度に比例する性質があり、コントラストと Q 値の積同様、改善が困難であった。

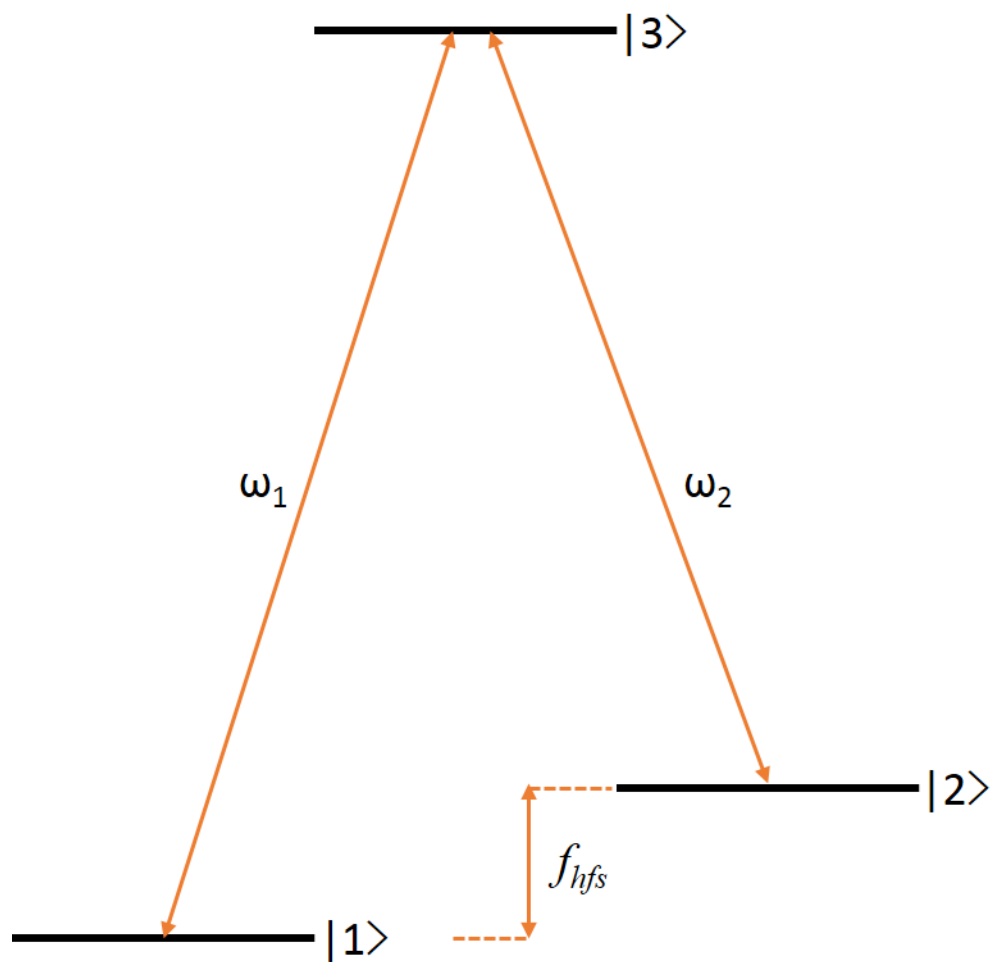


圖 2.5 Λ 型Ⅲ準位系

2.4.2 パルス励起

CPT 共鳴の周波数安定度改善策として、パルス励起法が注目されている。パルス励起法は CPT 共鳴の観測に使用するレーザをパルス化し、Ramsey-CPT 共鳴を励起させる方法である。連続励起とパルス励起の比較を図 2.6 に示す。パルス励起はパワーブロードニング効果を抑制するため、細い共鳴幅が得られる。そのため、コントラストを維持したまま Q 値を向上させることができ、短期安定度が改善される。また、パルス励起は周波数シフトの要因となるライトシフトを抑制するため、長期安定度も改善される。したがって、CPT 共鳴を用いた小型原子発振器にパルス励起を応用することで、周波数安定度の改善が可能とある。

パルス励起の観測手順を図 2.7 に示す。ここで、 τ はレーザを照射する励起継続時間、 T はレーザを照射しない自由発展時間、 τ_m はレーザが照射されてから観測を行うまでの観測タイミングを示す。まず第 1 パルスを τ 秒間照射し、原子を CPT 状態に励起する。次にレーザの照射をやめ、 T 秒後に再びレーザを照射する。そしてレーザの立ち上がり直後から τ_m 秒後にレーザ光の光強度を測定する。パルス毎に一定の観測タイミングで測定を繰り返すことで Ramsey-CPT 共鳴の観測が可能となる。このとき、レーザパルスの各パラメータにより Ramsey フリンジが変化する。

自由発展時間 T は共鳴幅に影響する。一般に、共鳴幅は自由発展時間 T を用いて $1/2T$ としてスケーリングされ、自由発展時間が長いほど共鳴幅が狭くなり Q 値が向上する (図 2.8)。しかし、自由発展時間の増加に伴いコントラストが低下するため、性能指数により自由発展時間の値を決める必要がある。

励起継続時間 τ はコントラストに影響する[13]。パルス励起では、CPT 状態の原子に時間間隔をおいて再度レーザを照射し励起させることで、Ramsey-CPT

共鳴が発生する。そのため、レーザの照射を切る前に原子を CPT 状態に励起させなければならない。励起継続時間が短いと原子を十分に励起できないため、中央フリンジの振幅が減少しコントラストが低下する。したがって、励起継続時間は一定以上の長さが必要となる。

観測タイミング τ_m はコントラストに影響する[13]。観測タイミングが短いほど、中央フリンジの振幅が増大しコントラストが増加する（図 2.9）。反対に、観測タイミングが短いと、ラムゼイフリンジが崩壊しコントラストが低下する。最終的に連続励起の CPT 共鳴に近づいていき、パルス励起による周波数安定度改善効果が失われる。したがって、観測タイミングは可能な限り短いことが要求される。観測タイミング短縮のため、レーザパルスは高速な光強度変調が必要となる。

レーザパルスを生成する最も簡単な方法は、駆動電流を変調することでレーザの ON/OFF を直接切り替える駆動電流変調である。しかし、駆動電流変調はレーザ内部の温度変動を引き起こし、同時に出力波長も変動してしまう。したがって、高速な光強度変調ができず観測タイミングが遅れてしまうため、Ramsey-CPT 共鳴の観測が困難となる。

そのためこれまでの報告では、レーザの変調に音響光学変調器のような外部光学変調器を使用している[13][14][26]。外部光学変調器を使用した場合、レーザ自体は常に光を照射し続けるため、波長変動が生じない。さらに高速な光強度変調が可能となり、観測タイミングを短縮できるため、高い周波数安定度が得られる。しかし、外部光学変調器は小型原子発振器と比べ体積・消費電力が大きい。そのため、小型原子発振器に適用することは難しい。本研究室で使用している音響光学変調器は消費電力 16.5 W、体積 13.3 cm³ であり、1.1 節で紹介した Microsemi 社の小型原子発振器（消費電力 125 mW、体積 16.8 cm³）と比較すると、音響

光学変調器の消費電力は約 132 倍、体積は 0.8 倍である。パルス励起法を小型原子発振器へ適用するには、音響光学変調器にかわる小型かつ低電力動作可能な変調方式が必要となる。

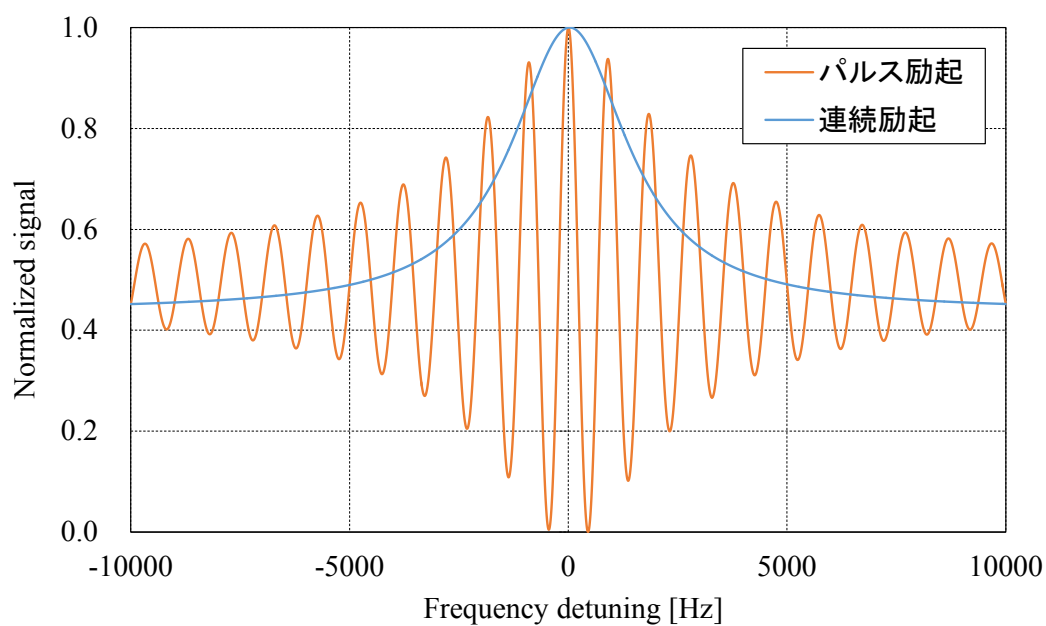


図 2.6 連続励起とパルス励起の比較

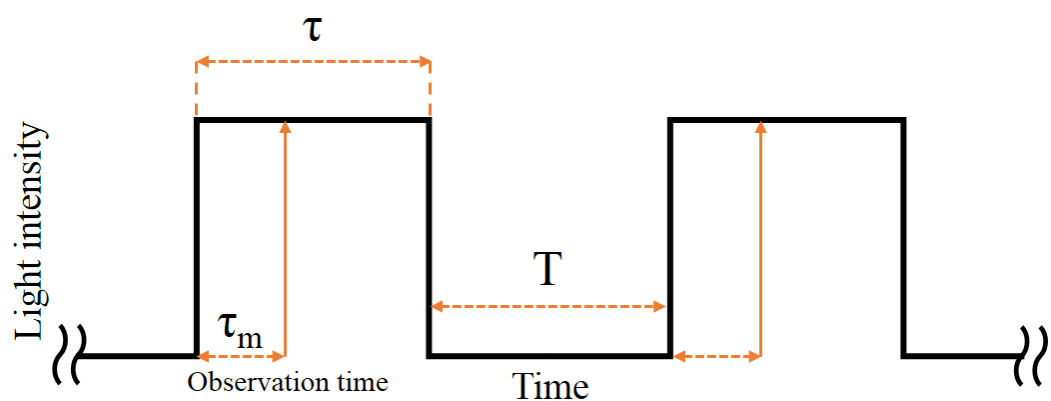


図 2.7 パルス励起の手順

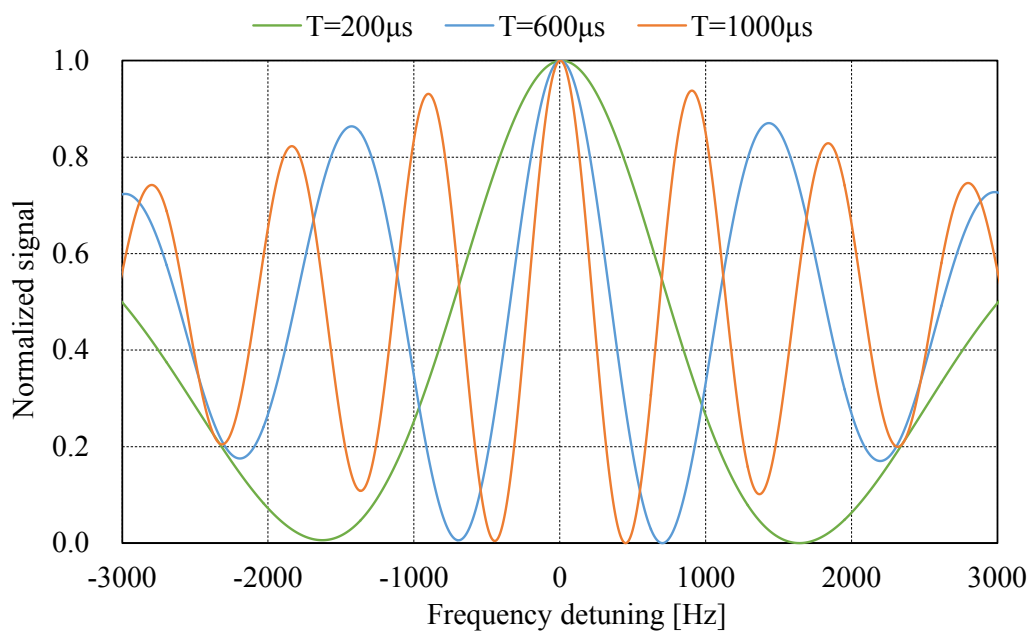


図 2.8 自由発展時間 T に対する共鳴スペクトル

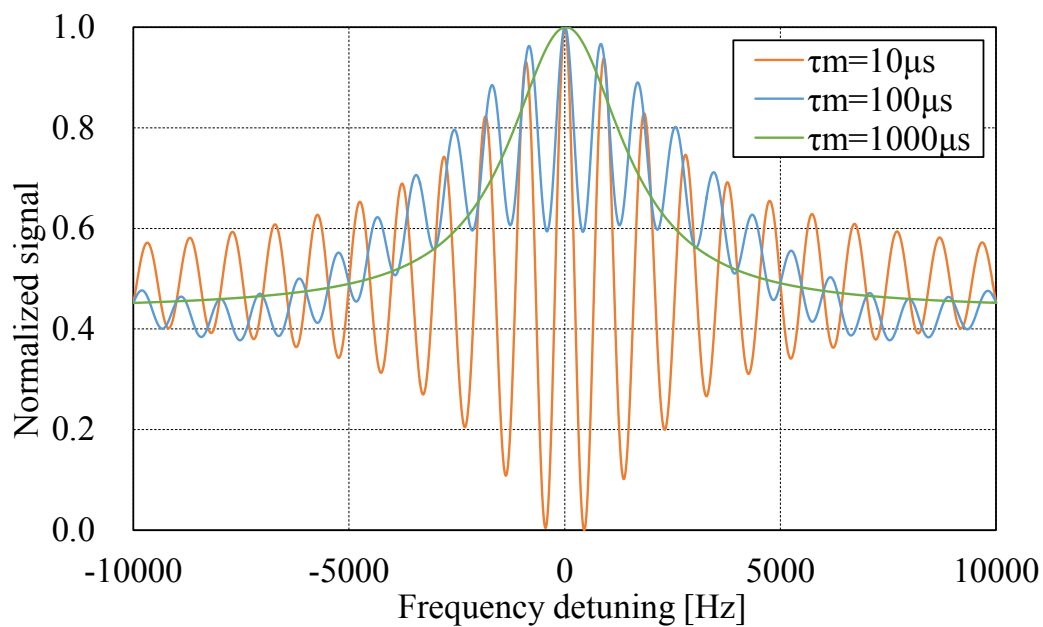


図 2.9 観測タイミング τ_m に対する共鳴スペクトル

2.5 RF 変調

この節では CPT 共鳴を発生させるのに必要な 2 本のレーザの生成方法について詳述する。小型原子発振器の場合、励起用レーザは一般に VCSEL が使用される。通常、2 本のレーザは小型化の観点から、単一の VCSEL を直接変調することで生成される。この変調方式は単純な FM (Frequency Modulation) 変調や AM (Amplitude Modulation) 変調と異なり、VCSEL の駆動電流に RF (Radio Frequency) 信号を重畳し周波数と振幅を同時に変調するものである。本論文では、この RF 信号による変調を RF 変調と呼ぶ。

RF 変調された VCSEL の出力レーザは複数のサイドバンドを持つ(図 2.10)。RF 変調は AM 変調の影響を受けるため、同じ次数でも光強度が異なるサイドバンドが生成される。さらに、RF 変調に用いる周波数を f_{RF} とすると、各サイドバンドはキャリア周波数から $\pm n f_{RF}$ (n は次数) だけ離れた周波数領域に現れる。そのため、アルカリ原子の基底準位間の周波数差 f_{hfs} の半分である $f_{hfs}/2$ で変調することで、CPT 共鳴の励起に必要な周波数差を持つ 2 つの 1 次のサイドバンドを生成した。

また、1 次のサイドバンド以外の光強度は CPT 共鳴の DC level 増加の要因となる。各サイドバンドの光強度は FM 変調度の値により増減するため、実験では連続励起のコントラストが最大となる 4 dBm に設定した (図 2.11)。

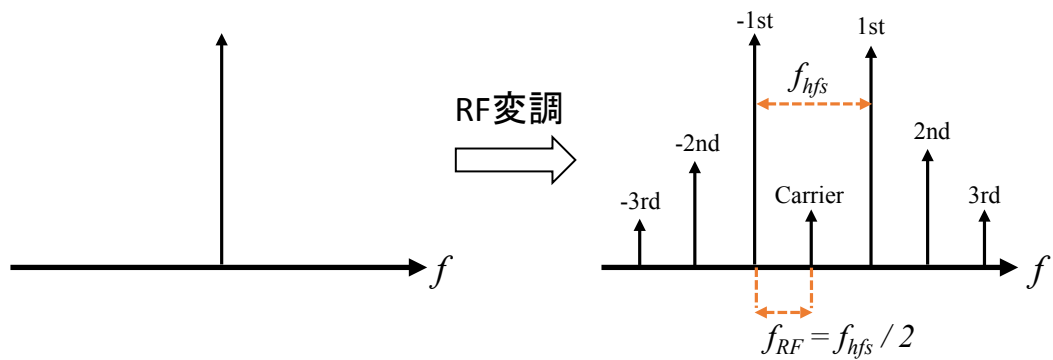


図 2.10 RF 変調の概略図

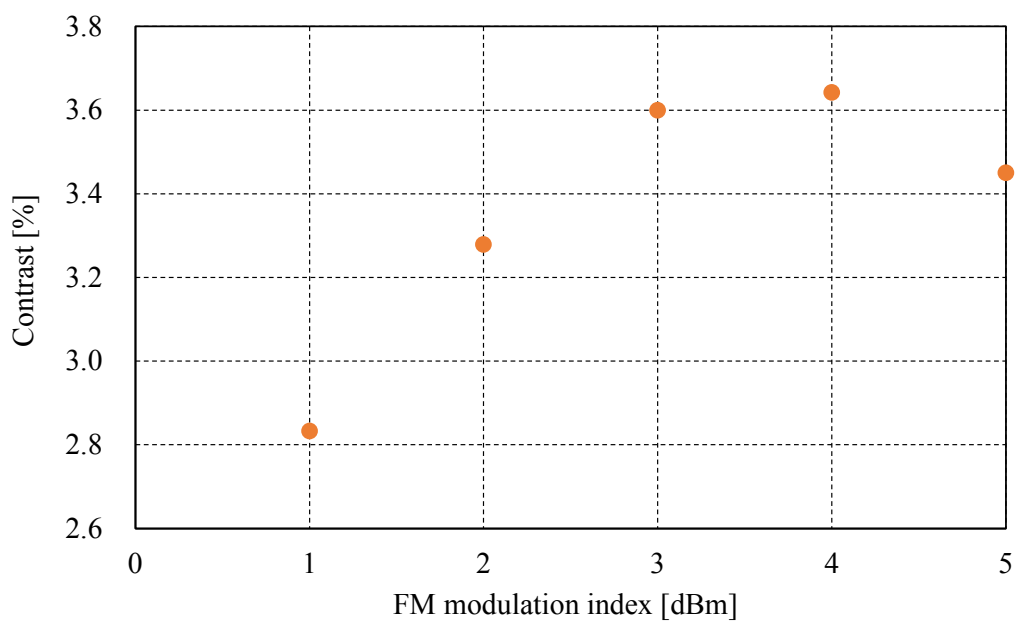


図 2.11 FM 変調度に対するコントラスト

第3章 駆動電流変調

3.1 まえがき

本章では、VCSELの駆動電流変調について詳述する。VCSELに電流パルスを入力したときの透過光を観測し、透過光に現れる吸収線から波長変動を算出した。また、波長の立ち上がり時間の改善策として2段電流パルスによる駆動電流変調を提案する。最後に、提案法を実現するための装置構成について説明し、提案法によるRamsey-CPT共鳴の観測法について述べる。

3.2 駆動電流変調とは

駆動電流変調とは、励起用レーザに電流パルスを入力し、レーザのON/OFFを直接切り替える方法である。音響光学変調器によるレーザパルス化と異なり、駆動電流変調は電流制御以外に特別な装置を必要としない。そのため、実現できれば従来の小型原子発振器に対し体積・消費電力を増加させることなくパルス励起が適用でき、周波数安定度の改善が可能となる。

しかし、駆動電流変調によりレーザパルスを生成した場合、駆動電流の変動により内部温度が変動し、励起用レーザとして使用するVCSELの活性層が膨張と収縮を繰り返す。それに伴い出力波長も変動してしまうため、レーザOFFの状態から再び所望の波長を出力するまでに時間を要し、駆動電流変調をパルス励起へ適用することが困難であった。この問題を解決するため、本論文では2段電流パルスによる駆動電流変調方式を検討した。

3.3 1 段電流パルス

電流パルスを用いて駆動電流変調した VCSEL の様相を示す。後述する 2 段電流パルスと区別するため、本論文では通常の電流パルスを 1 段電流パルスと呼ぶ。

図 3.1 に実験装置のブロック図を示す。VCSEL に 1 段電流パルスを入力し、レーザパルスを生成する。同時に、4.6 GHz の RF 信号を入力し RF 変調を行う。生成されたパルスレーザを ^{133}Cs が封入されたガスセルに照射し、透過光をフォトダイオードで検知した。フォトダイオードは光強度を電流値として出力するため、電流/電圧変換回路を介して電圧値に変換し測定している。

観測された透過光の様相を図 3.2 に、透過光の立ち上がり付近の拡大図を図 3.3 に示す。透過光強度が減少しているところは吸収線と呼ばれ、波長変動に伴いキャリアと各サイドバンドが遷移周波数に一致し、レーザ光が原子に吸収されたために生じている。吸収線の吸収量の違いや吸収線が現れる順番から、吸収に使われた 2 つのサイドバンドと励起準位の組み合わせがわかる。図中にはそれぞれの吸収線で吸収されているサイドバンドと励起準位を示した。ここで、 λ_c はキャリア波長を表す。

パルス励起ではレーザの照射を停止する前に原子を CPT 状態に励起させる必要がある。CPT 共鳴は吸収量が最大となる波長で発生するため、吸収線の最小値がパルス終端まで持続するよう調整した。吸収線は CPT 共鳴のコントラストが最大となるよう、2 つの 1 次のサイドバンドと励起準位 $F'=3$ の組み合わせを選択している。パルス終端に出力波長を調整するため、レーザが照射されてから CPT 共鳴の観測に使う波長を出力するまでに時間を要する。この時間を立ち上がり時間 T_{rise} と定義すると、電流パルス ON 時間 $5000\ \mu\text{s}$ 、電流パルス OFF 時間 $600\ \mu\text{s}$ に設定した場合、立ち上がり時間はおよそ $3000\ \mu\text{s}$ であった。この

立ち上がり時間 T_{rise} が観測タイミングの短縮を阻害するため、Ramsey フリンジが崩壊してしまい、Ramsey-CPT 共鳴の観測が困難となる。

次に吸収線から推定したキャリア波長の時間変動を図 3.4 に示す。なお、波長の推定方法は 3.4 節で詳述する。縦軸は推定した出力波長を表し、横軸はレーザ照射直後からの時間を示している。図中には、2 つの 1 次のサイドバンドと励起準位 $F'=3$ による CPT 共鳴が観測される際のキャリア波長を目標値としてプロットした。推定結果から出力波長は目標値まで指数関数的に増加していくことがわかる。

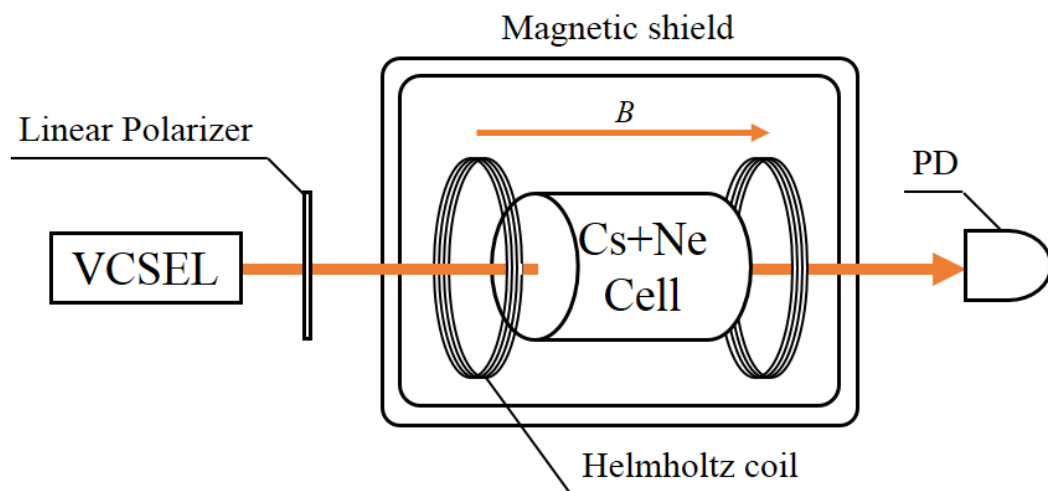


図 3.1 透過光観測の装置構成図

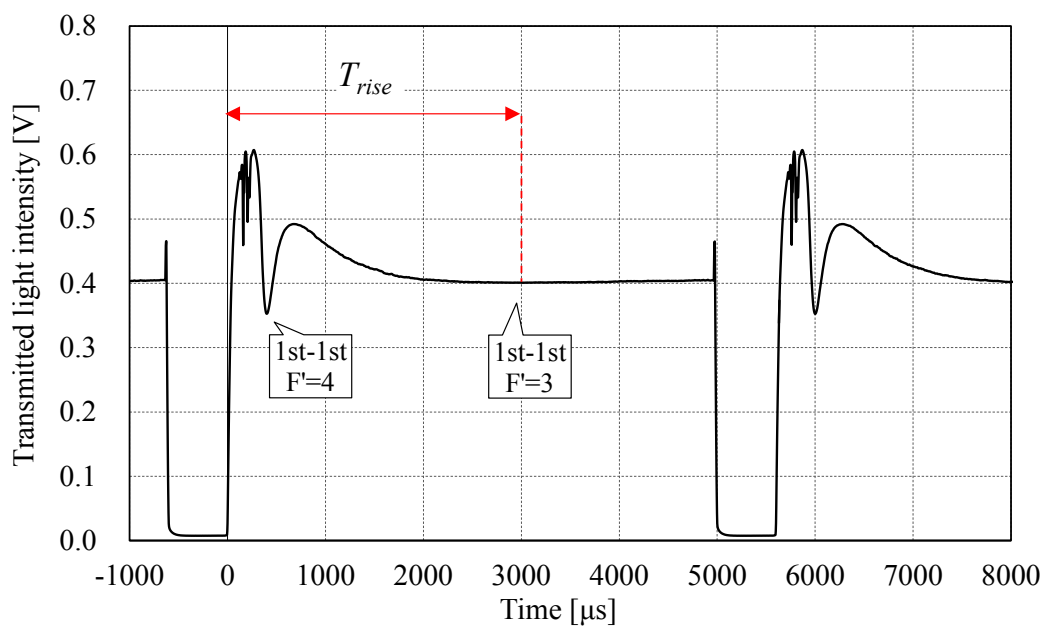


図 3.2 1 段電流パルス入力時の透過光（全体）

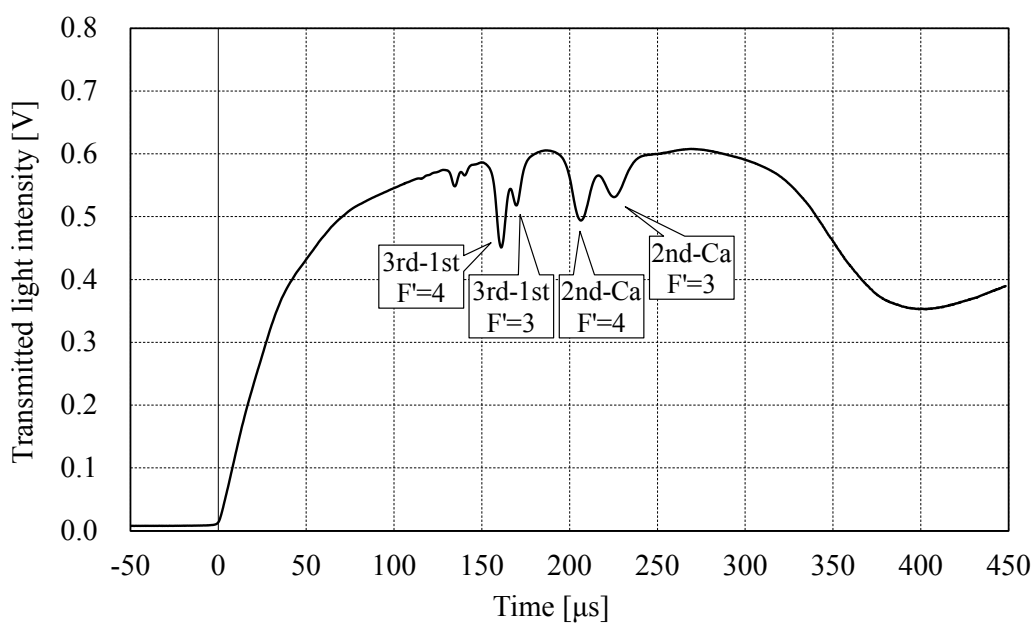


図 3.3 1 段電流パルス入力時の透過光（立ち上がり）

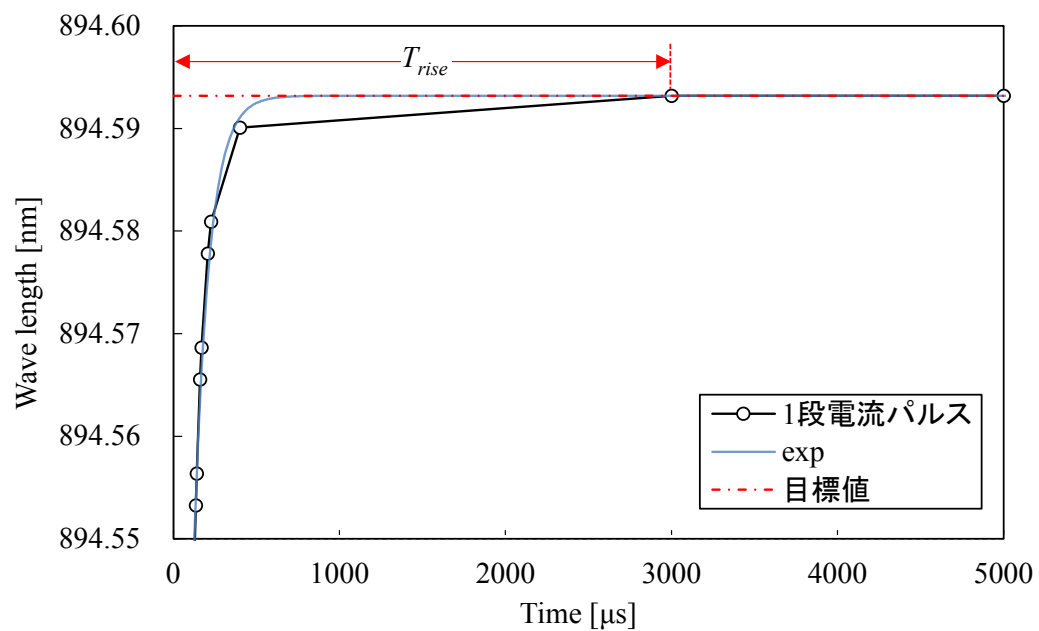


図 3.4 1 段電流パルス入力時のキャリア波長の時間変動

3.4 2 段電流パルス

次に 2 段電流パルスを用いて駆動電流変調した VCSEL の様相を示す。実験装置は図 3.1 と同じものを使用し、入力する電流パルスのみ変化させた。2 段電流パルスの概略図を図 3.5 に示す。ここで I_1 と I_2 はそれぞれ 1 段目の電流と 2 段目の電流を示し、 $I_1 > I_2$ となるよう設定する。 T_1 は 1 段目電流 I_1 の入力時間であり、出力波長が目標値に達した瞬間に I_2 に切り替わるよう設定する。 T_{ON} は電流パルス ON 時間を表し、 I_1 の入力時間と I_2 の入力時間を合計した時間である。 T_{OFF} は電流パルス OFF 時間を示す。1 段目電流 I_1 は VCSEL の内部温度を上昇させ、波長の立ち上がり時間を短縮する。2 段目電流 I_2 はパルス後半において 2 つの 1 次のサイドバンドと励起準位 $F' = 3$ が作る吸収線の最小値を維持するよう調整する。波長の立ち上がりと維持を行う電流を分けたことで、早い観測タイミングと十分な励起持続時間の確保を可能とした。

2 段電流パルスを用いた駆動電流変調により観測された透過光の様相を図 3.6 と図 3.7 に示す。また、吸収線から推定したキャリア波長の時間変動を図 3.8 と図 3.9 に示す。1 段電流パルスの場合と異なり、出力波長は所望の値まで上昇したのち、一度下降する。その後指数関数的に増加し、パルス後半で目標値を維持する。出力波長が増減することにより、透過光には 1 段電流パルス入力時よりも多くの吸収線が現れる。

最初に出力波長が目標値に到達したと同時に観測を行うため、2 段電流パルスによる駆動電流変調の立ち上がり時間はレーザが照射されてから最初に所望の波長に到達するまでの時間となる。これにより 1 段電流パルスでは $3000 \mu s$ だった波長の立ち上がり時間を $50 \mu s$ まで短縮した。また、2 段電流パルスを用いた際の立ち上がり時間は、1 段目電流 I_1 と入力時間 T_1 を調整する事で任意の時間に設定可能である。

異なる立ち上がり時間におけるキャリア波長の時間変動を図 3.10 に示す。同図は立ち上がり時間を $50\mu\text{s}$ と $100\mu\text{s}$ に設定した 2 段電流パルスと 1 段電流パルスにより駆動電流変調を行った際の、キャリア波長の立ち上がりを示している。立ち上がり時間が早いと出力波長の下降の幅が大きくなっており、下降から上昇に切り替わった後では、立ち上がり時間に関わらず出力波長は 1 段パルスと同様の増加傾向を示している。

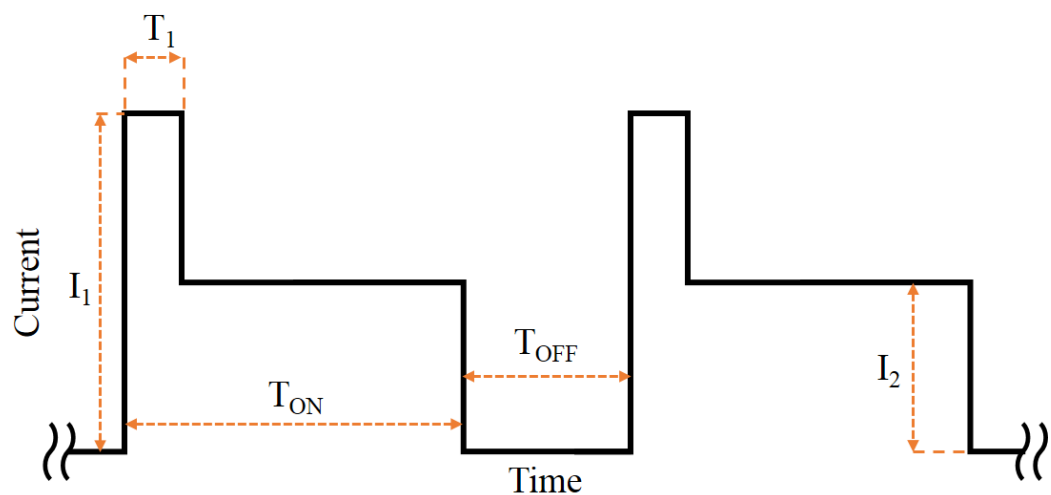


図 3.5 2 段電流パルスの概略図

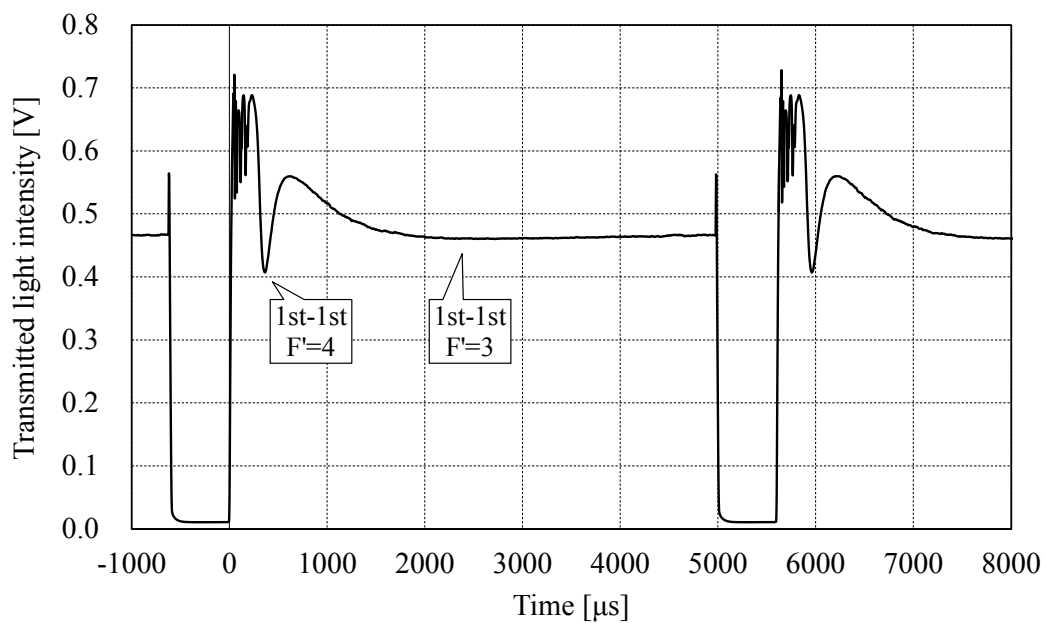


図 3.6 2 段電流パルス入力時の透過光（全体）

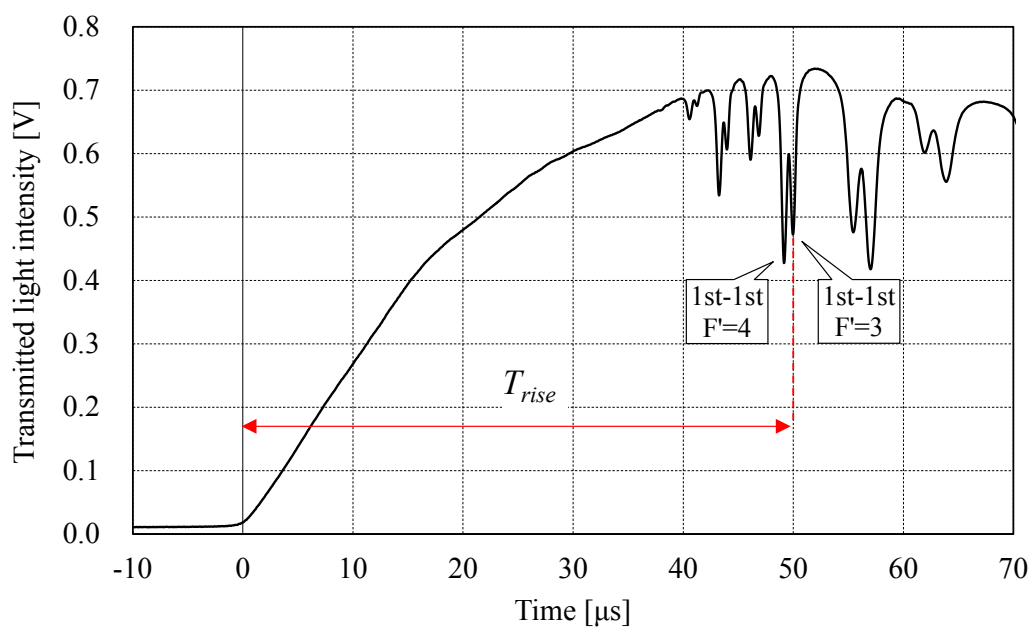


図 3.7 2 段電流パルス入力時の透過光（立ち上がり）

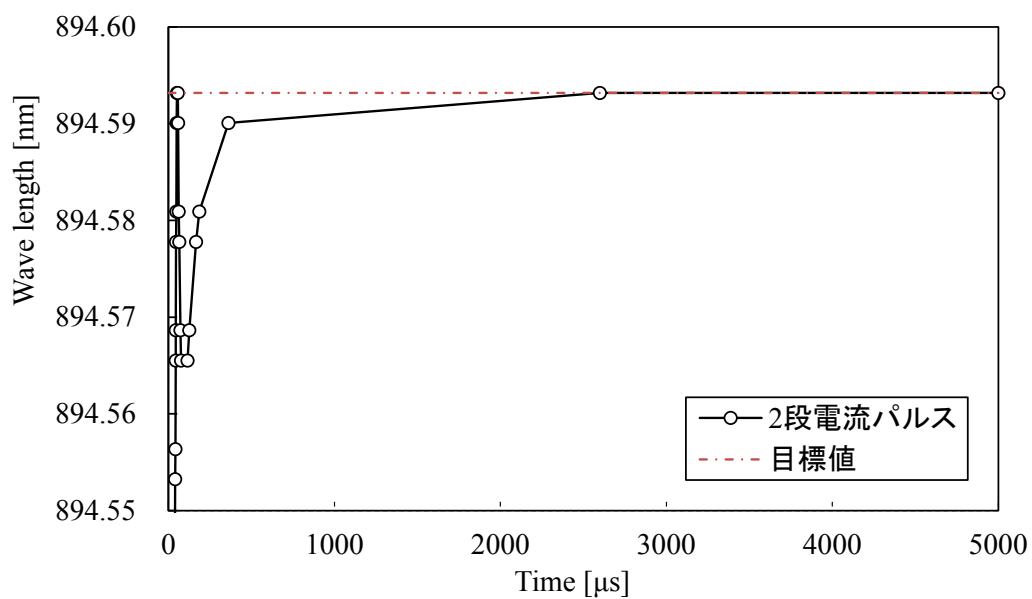


図 3.8 2 段電流パルス入力時のキャリア波長の時間変動（全体）

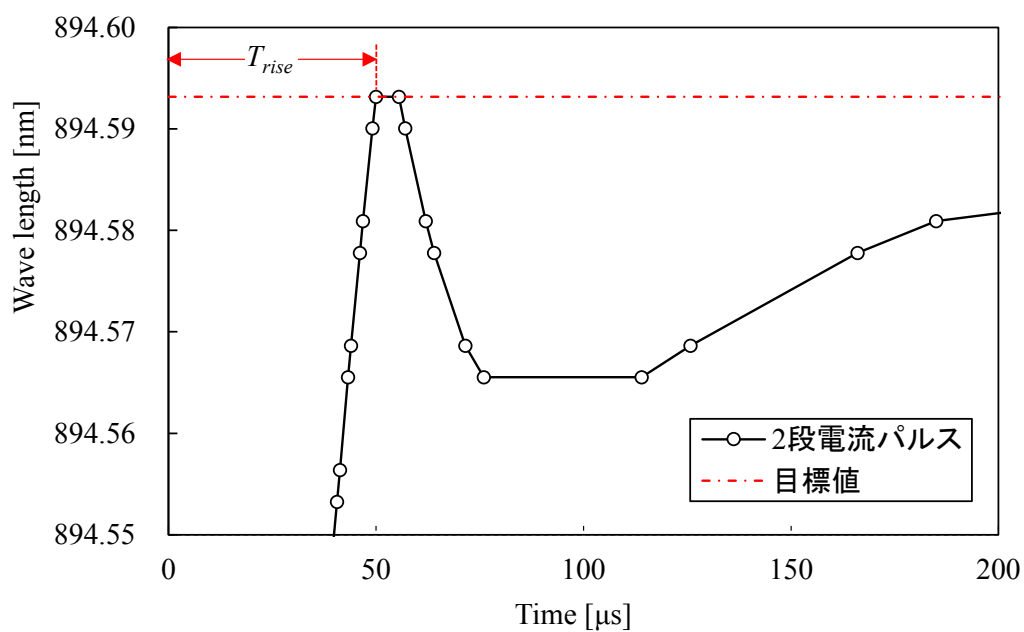


図 3.9 2 段電流パルス入力時のキャリア波長の時間変動（立ち上がり）

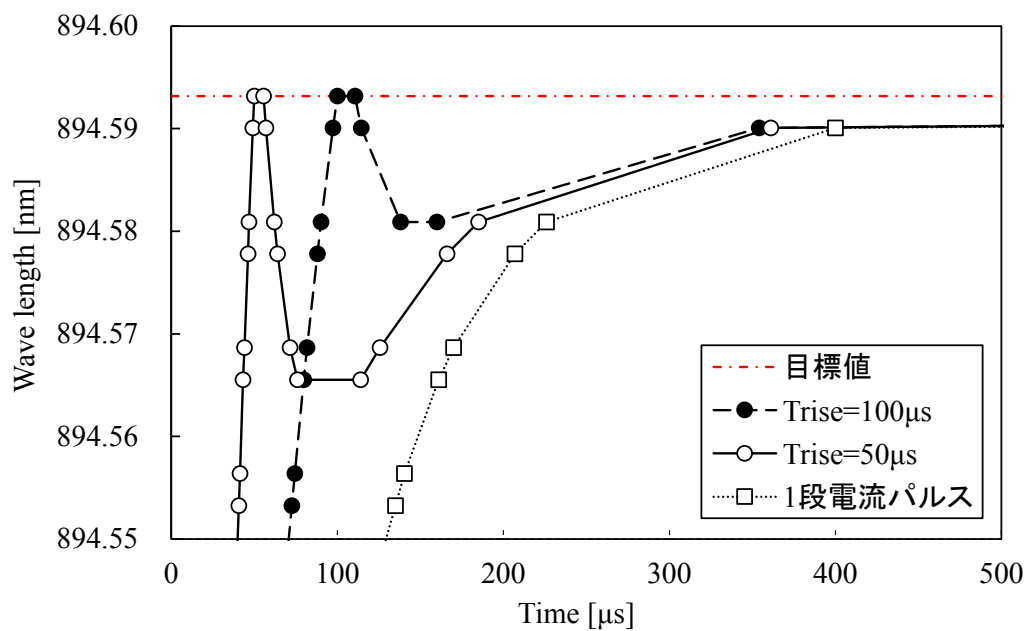


図 3.10 異なる立ち上がり時間におけるキャリア波長の時間変動

3.5 波長変動の推定方法

波長変動は、吸収線からキャリア周波数の変動を導出し、伝搬速度を光速と仮定して以下の式から算出した。

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

透過光に現れる複数の吸収線は、レーザの周波数変動に伴い各サイドバンドの周波数が原子の遷移周波数に一致することで生じる。遷移周波数は原子の基底準位と励起準位の組み合わせの数だけ存在し、Cs の D₁ 線を利用した場合、基底準位が F=3 と F=4 の 2 つ、励起準位が F'=3 と F'=4 の 2 つあるため、4 つの遷移周波数を持つ (図 3.11)。

それぞれの遷移周波数を $f_{FF'}$ とし、遷移周波数と RF 変調されたレーザのサイドバンドとの関係を図 3.12 に示す。ここで、キャリア周波数に対しプラス側とマイナス側のサイドバンドを区別するため、プラス側のサイドバンドには「+」を、マイナス側のサイドバンドには「-」をつけて表した。実験ではレーザの変調周波数 f_{RF} は ¹³³Cs の基底準位間の周波数差 f_{hfs} の半分である 4.6GHz で変調している。 f_{hfs} は共通の励起準位を持つ遷移周波数の周波数差に一致するため、励起準位 F'=3 への遷移周波数 f_{33} と f_{43} の吸収が同時に生じる。同様に励起準位 F'=4 への遷移周波数 f_{34} と f_{44} の吸収も同時に生じる。したがって、1 つの吸収線に 2 つのサイドバンドが吸収されている。また、1 次のサイドバンドの光強度が最も強くなるように変調度を調整しているため、各吸収線の吸収量と吸収線が現れる順番から吸収された 2 つのサイドバンドの組み合わせが分かる。さらに、隣り合うサイドバンドの周波数差は変調周波数 f_{RF} と等しいことから、キャリア周波数 f_C は以下の式で求められる。

$$f_C = f_{FF'} - n f_{RF} \quad (3.2)$$

ここで n は f_{FF} に吸収されるサイドバンドの次数を表す。キャリア周波数およびキャリア周波数から算出した波長を表 3.1 に示す。各吸収線からキャリア周波数を導出し、レーザ立ち上がり直後から吸収線が現れるまでの時間を測定することで、キャリアの波長変動が算出可能となる。

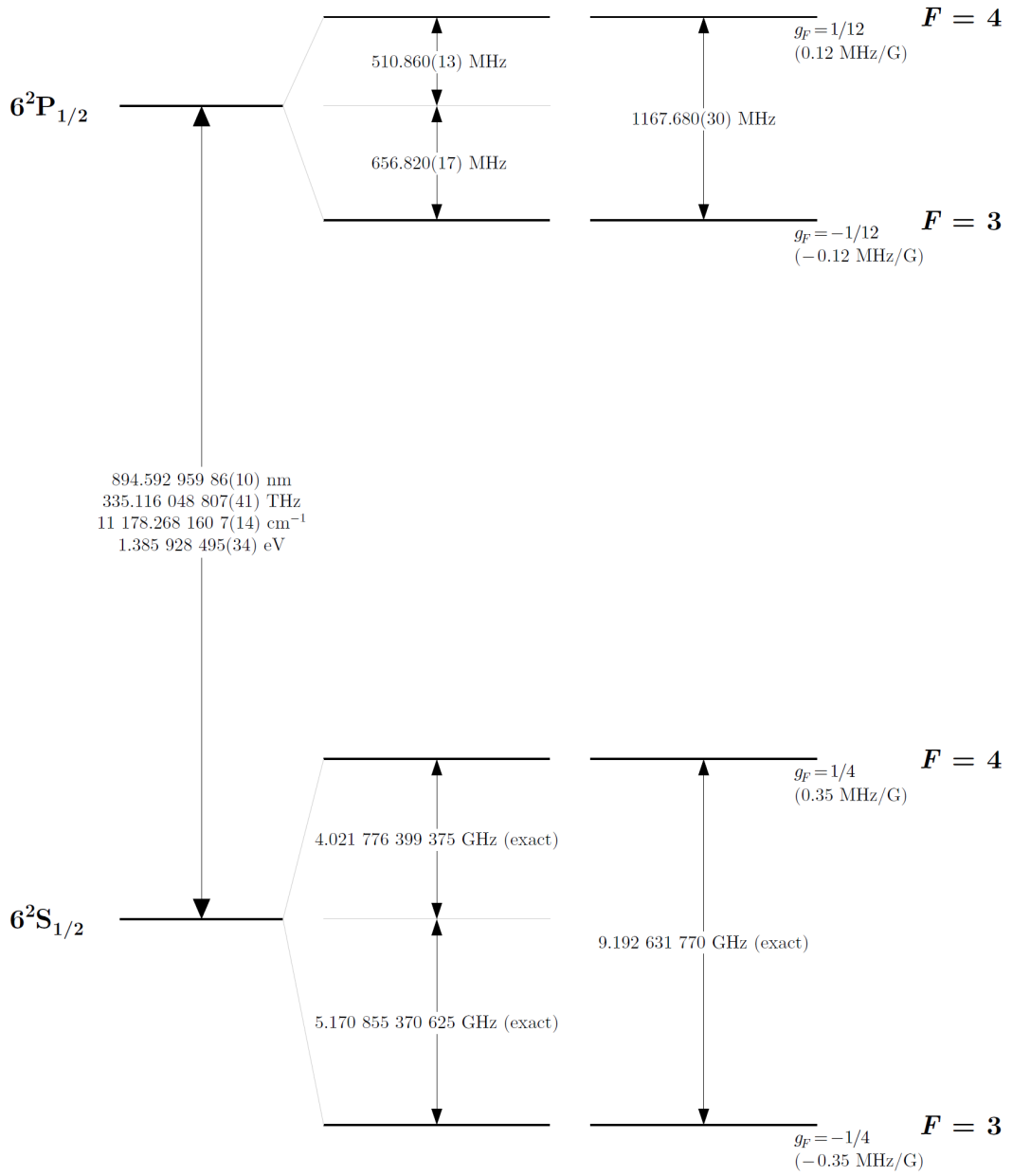


図 3.11 Cs-D₁ 線の準位構造 (文献[24]より引用)

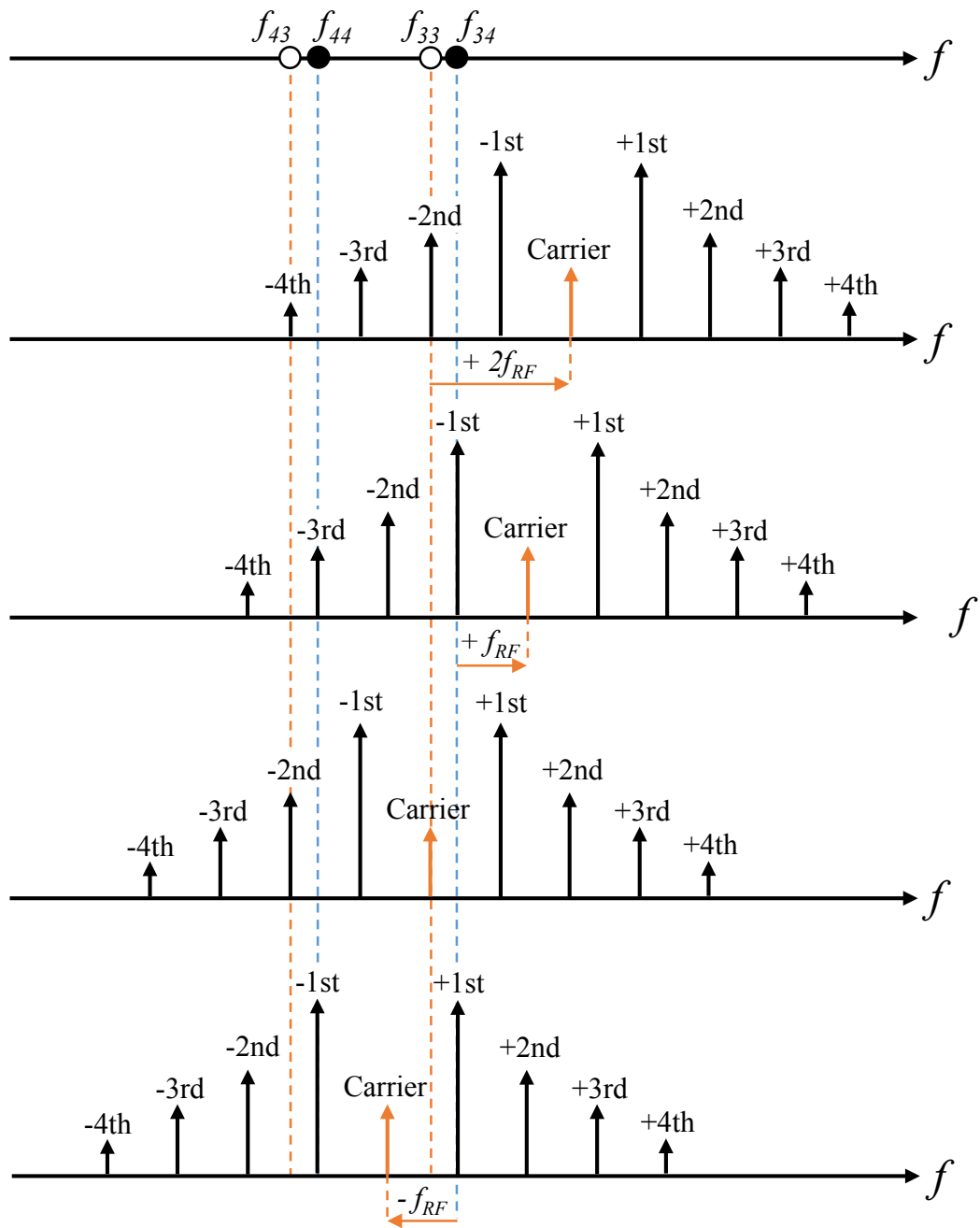


図 3.12 波長変動推定の概略図

表 3.1 キャリア波長の推定結果

吸収されるサイドバンド		励起準位	Carrier周波数		Carrier波長	
-4th	-2nd	F'=4	335.1401158	THz	894.5287176	nm
		F'=3	335.1389481	THz	894.5318343	nm
-3rd	-1st	F'=4	335.1355195	THz	894.5409859	nm
		F'=3	335.1343518	THz	894.5441027	nm
-2nd	Carrier	F'=4	335.1309232	THz	894.5532545	nm
		F'=3	335.1297555	THz	894.5563714	nm
-1st	+1st	F'=4	335.1263268	THz	894.5655235	nm
		F'=3	335.1251592	THz	894.5686404	nm

3.6 装置構成

2 段電流パルスによる駆動電流変調を実現するための実験装置の構成を図 3.13 に示す。励起用レーザは ^{133}Cs の D_1 線で励起させるため、895 nm の出力波長を持つ VCSEL を使用した。VCSEL には field-programmable gate array (FPGA) と D/A コンバータを組み合わせ生成した 2 段電流パルスが入力される。加えて、サイドバンドを生成するため 4.6 GHz の高周波信号が Bias T を介して入力される。このとき、VCSEL の温度は温度制御付きマウント (TCLDM9) を用いて 45.00 度に保っている。

VCSEL から出力されたレーザ光は直線偏光板により直線偏光に調整され、セルに照射される。セルは直径 22.5 mm、光路長 20.0 mm の円筒型のパイレックスセルで、アルカリ原子である ^{133}Cs とバッファガスとして Ne が 4.0 kPa 封入されている。さらにヘルムホルツコイルにより静磁場を印加しゼーマン分裂させることで、時計遷移の CPT 共鳴を選別した。また、セルとヘルムホルツコイルを磁気シールドで覆い、外部磁場の影響を除去した。セル温度は CPT 共鳴のコントラストが最大となる 42 度に設定している。

セルを透過した光はフォトダイオード (PD) により検出される。検出された信号は共鳴観測のためサンプルホールド回路に送られると同時に、フィードバック制御のためロックインアンプと制御回路に送られる。サンプルホールド回路は透過光強度を、レーザ光の立ち上がりから任意のタイミングで測定する。一方、ロックインアンプはパルス後半における出力波長のずれを検知し、電流源を制御することで一定の波長に保つ。また、制御回路は波長の立ち上がり時間のずれを検知し、FPGA にフィードバックすることで 2 段電流パルスを制御し立ち上がり時間を一定に保つ。実際の実験装置を図 3.14 に示す。装置全体は除振台の上に設置され、遮光板に囲われている。

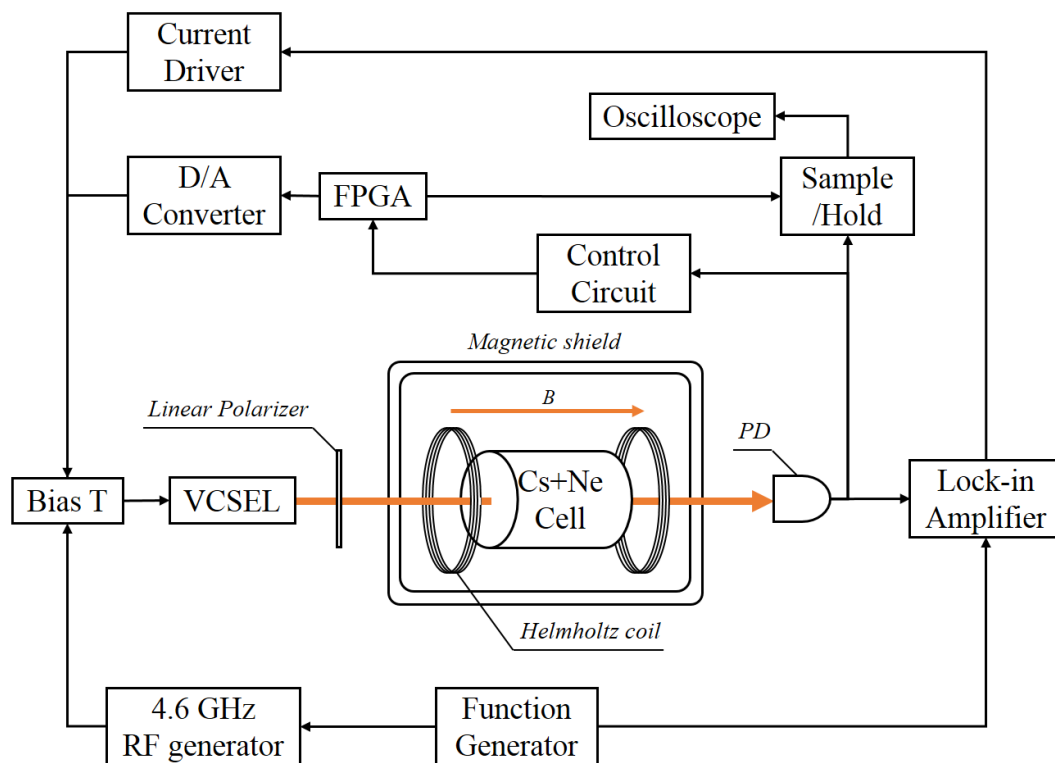


図 3.13 装置構成図

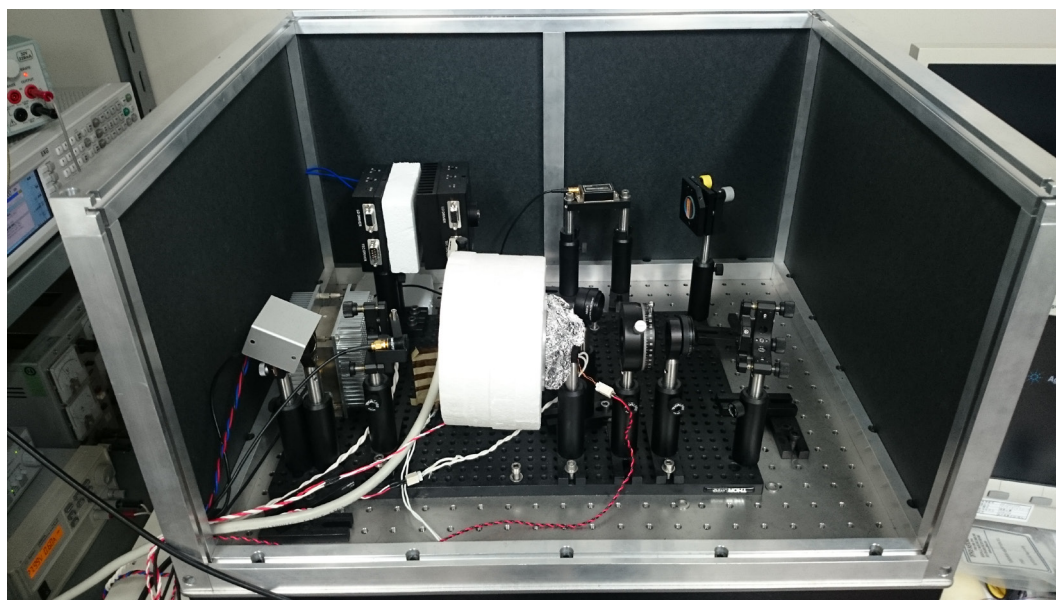


図 3.14 実験装置

3.6.1 2 段電流パルス電流源

2 段電流パルスは FPGA と D/A コンバータを組み合わせて生成した。FPGA は位相同期回路 (PLL) や入出力ピンなどの周辺回路が付いた DE0 (Altera 社) を使用している (図 3.15)。また、D/A コンバータは 12 ビット電流出力型の DAC8043 を使用した。DE0 と D/A コンバータの接続は、DE0 のノイズを低減するためデジタルアイソレータによる絶縁が行われている (図 3.16)。さらに、D/A コンバータの出力電流を増幅させるため、10 倍の増幅率を持つ電流増幅回路を使用した。電流増幅回路後の出力電流 I_o は以下の式で表される。

$$I_o = \frac{x}{4096} V_{ref} [mA] \quad (3.3)$$

ここで、 x は DE0 からの出力であり、 V_{ref} は DAC8043 に入力するリファレンス電圧である。

出力電流は V_{ref} を 9V に設定した場合、およそ $2.2 \mu A$ 刻みで調整が可能である。しかし、CPT 共鳴の観測に必要な波長を制御する場合、さらに細かい調整が必要となる。そこで、直流電流源を用いて 2 段電流パルスに直流電流を可算し、 $0.01 \mu A$ 刻みの調整を可能とした。直流電流は VCSEL のしきい値を超えない値で設定されており、2 段電流パルス OFF 時にはレーザの出力も OFF となる。さらに、パルス OFF 時にも電力を加えることで、温度変動の抑制効果が期待できる。

一方、2 段パルス電流の時間設定は 10ns 刻みで調整可能である。本来、DAC8043 のクロック周期は 210ns 以上であり、出力電流の切り替えは 210ns 刻みでなければ不可能である。そこで、DAC8043 に出力する電流値を読み込ませた直後に入力クロックを切り、電流値を変更する際に再度クロック信号を入力し直す方法をとった。DAC8043 のクロック信号は DE0 で生成しているため、

DE0 の内部クロックと同じ 10ns 刻みの調整が可能である。さらに、DAC8043 に入力する余分なクロック信号をカットすることで、クロックによるノイズを低減した。

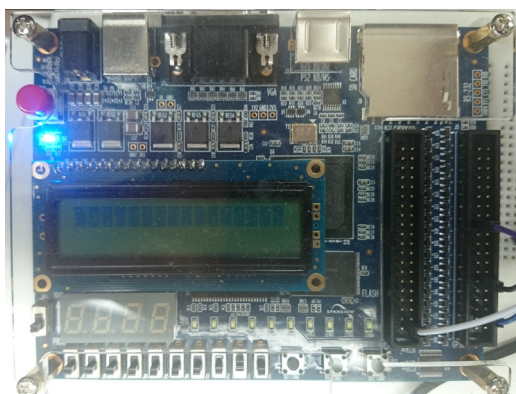


図 3.15 DE0 FPGA (Altera 社)

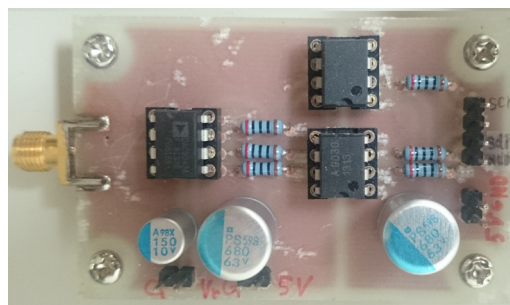


図 3.16 D/A 変換回路

3.6.2 サンプルホールド回路

パルス励起の観測には任意のタイミングで透過光の信号を測定するため、サンプルホールド回路を製作した (図 3.17)。サンプルホールド回路の概略図を図 3.18 に示す。サンプルホールド回路はサンプルモードとホールドモードの 2 つのモードを持ち、参照信号によりモードの切り替えを行う。参照信号が入力されているときはサンプルモードとなり、入力された信号をそのまま出力する。次に参照信号が OFF になると、直前に入力された信号を維持し続ける。パルス励起では入力端子に透過光の信号を入力し、各パルスの立ち上がり直後の信号を保持することで、Ramey-CPT 共鳴の観測が可能となる。

実験では FPGA により参照信号を出力し、レーザ光の立ち上がりからホールドモードに切り替わるまでの時間を一定に保っている。波長の立ち上がり時間

を調整し、パルス毎に吸収線の最小値の信号を保持することで、駆動電流変調による Ramsey-CPT 共鳴の観測を可能とした。



図 3.17 サンプルホールド回路

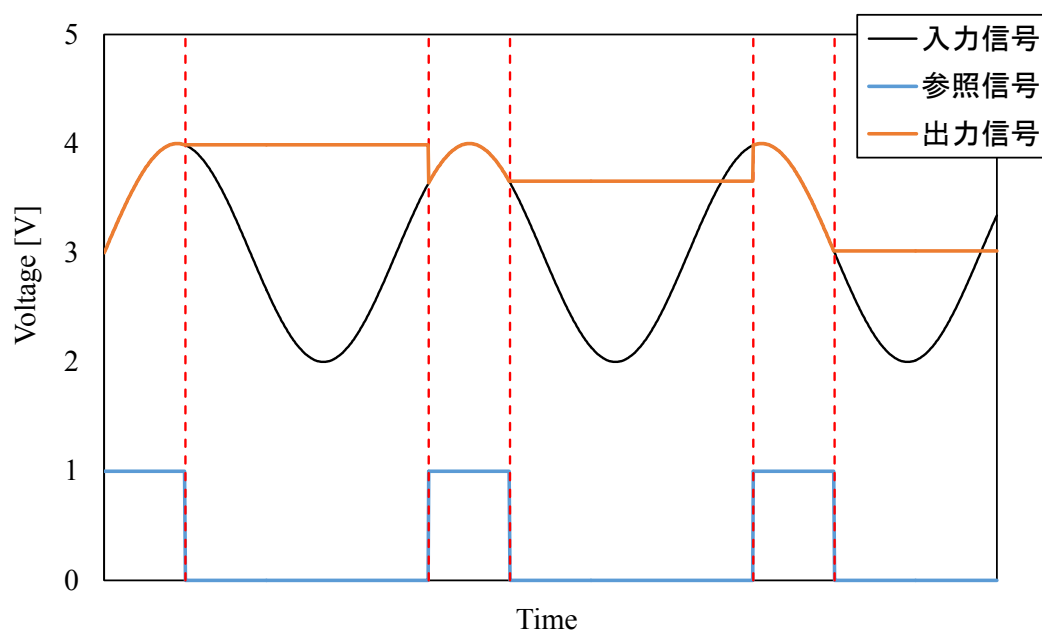


図 3.18 サンプルホールドの概略図

3.6.3 立ち上がり時間の制御

Ramsey-CPT 共鳴は観測タイミングにより中央フリンジのコントラストが変動するため、パルス毎に一定の観測タイミングを保つ必要がある。そのため、駆動電流変調では波長の立ち上がり時間を常に一定に保たなければならない。しかし、駆動電流変調は室温や入力電流の変化に伴い立ち上がり時間が変動する。そこで、透過光からフィードバックを行い、立ち上がり時間を制御する回路を製作した (図 3.19)。

立ち上がり時間の変化は透過光に吸収線のずれとして現れる (図 3.20)。まず、目標となる立ち上がり時間の前後の信号を、サンプルホールド回路を介して交互にサンプリングする。立ち上がり時間の目標値とサンプリングする時間を SH1 と SH2 として図に示す。サンプルホールド回路の出力は SH1 と SH2 でホールドした電圧を繰り返す矩形波となる。立ち上がり時間が目標値と同じ場合、矩形波の振幅は最小となる。ところが、目標値とずれがある場合、矩形波の振幅が増加する。サンプルホールド回路から出力される矩形波をロックイン回路に入力することで、矩形波の位相差が検出可能となる。さらにロックイン回路からの信号を A/D コンバータによりデジタル信号に変換し、FPGA にフィードバックする。FPGA はフィードバックされた信号を元に 1 段目電流の入力時間 T_1 を調整することで、立ち上がり時間を一定に保つ。

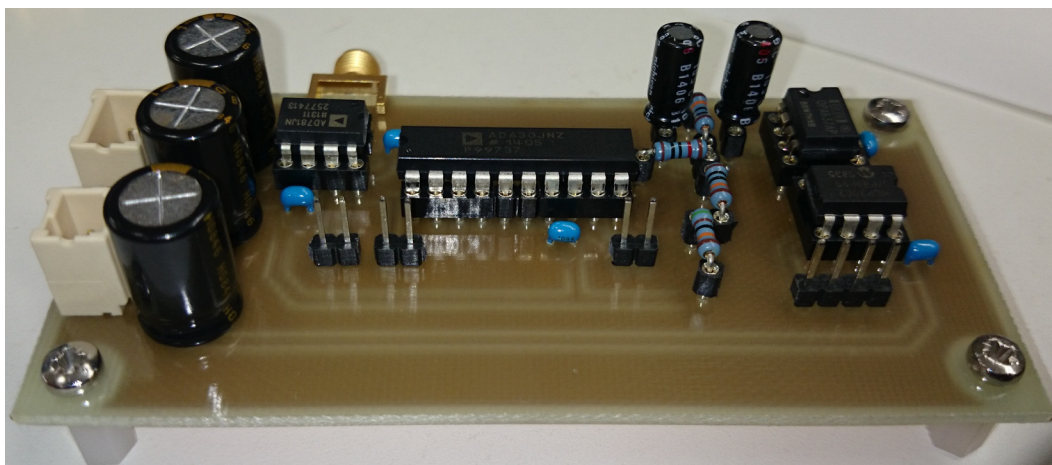


図 3.19 立ち上がり時間制御用回路

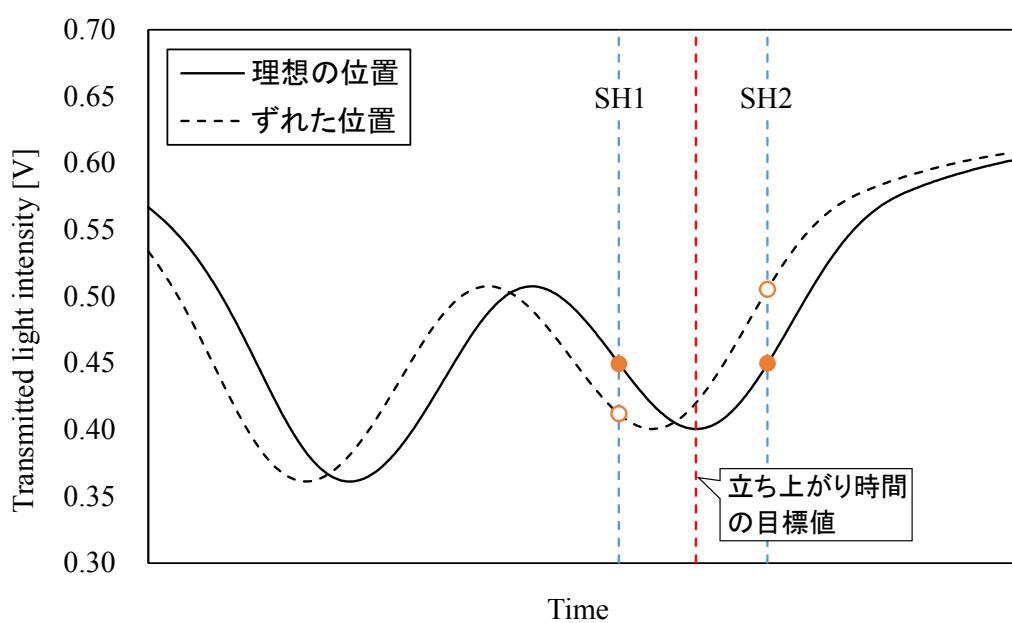


図 3.20 立ち上がり時間制御の概略図

第4章 駆動電流変調による Ramsey-CPT共鳴の 観測結果

4.1 まえがき

本章では、駆動電流変調による共鳴の観測結果について述べる。2 段電流パルスを用いることで Ramsey-CPT 共鳴が観測可能であることを示す。さらに、本提案手法の有効性を確認するため、音響光学変調器を用いた結果との比較を行った。比較項目として、半値全幅・コントラスト・性能指数の自由発展時間に対する特性を評価した。実験結果より、提案法は音響光学変調器と同等の短期安定度改善効果があることを示す。

4.2 Ramsey-CPT 共鳴のスペクトル

1 段電流パルスと 2 段電流パルスを用いた駆動電流変調による CPT 共鳴の観測結果を示す。電流パルス ON 時間と電流パルス OFF 時間は同じ条件に設定し、立ち上がり時間による共鳴の違いを比較した。

4.2.1 1 段電流パルス

1 段電流パルスによる駆動電流変調を用いたパルス励起の測定結果を図 4.1 に示す。縦軸は各共鳴の振幅で規格化した透過光強度、横軸は共鳴周波数からの周波数離調を表す。図は電流パルス ON 時間 $5000 \mu\text{s}$ 、電流パルス OFF 時間 $600 \mu\text{s}$ に設定し、立ち上がり時間 $3000 \mu\text{s}$ として測定した結果である。

1 段電流パルスでは、パルス励起の特徴である Ramsey フリンジが観測できず、連続励起と同様の共鳴が観測された。これは立ち上がり時間の増加により、1 次のサイドバンド以外の波長の影響や、1 次のサイドバンドの作る吸収線の最小値に達するまでの時間が増加し、観測タイミングの遅れと同様の影響が出たためであると考えられる（図 3.2 参照）。吸収線は原子が励起され光を吸収する

ことで現れるが、吸収が始まり最小値に到達するまでの間にも励起が生じている。したがって、共鳴を観測するまでに原子が十分に励起されてしまい、連続励起と同じ状態になったと考えられる。

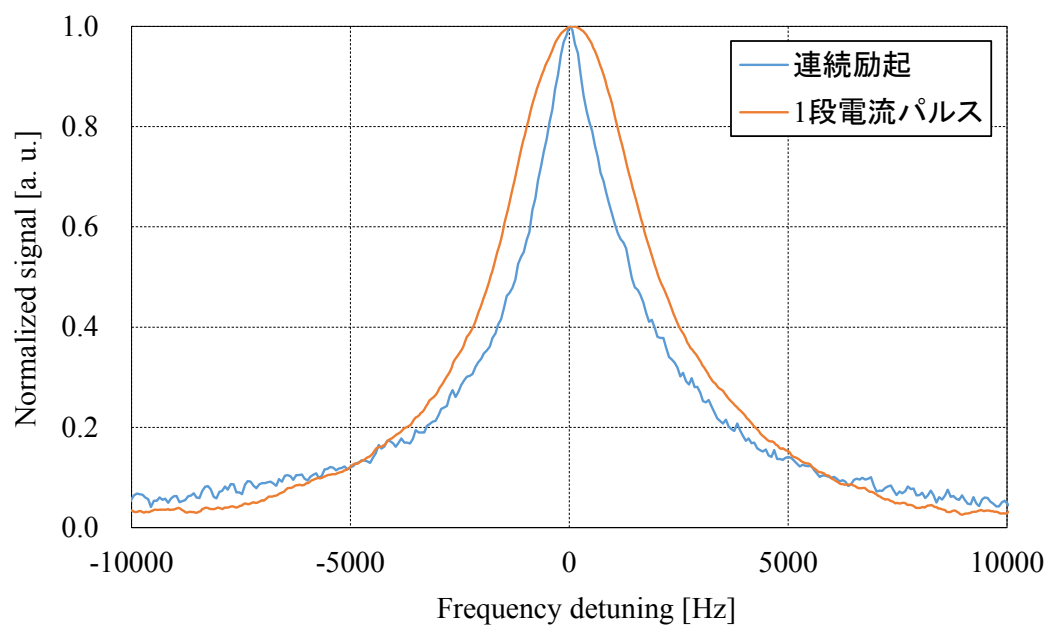


図 4.1 1 段電流パルスによる共鳴スペクトル

4.2.2 2 段電流パルス

2 段電流パルスによる駆動電流変調を用いたパルス励起の測定結果を図 4.2 に示す。縦軸は各共鳴の振幅で規格化した透過光強度、横軸は共鳴周波数からの数値離調を表す。図は電流パルス ON 時間 $5000 \mu\text{s}$ 、電流パルス OFF 時間 $600 \mu\text{s}$ 、立ち上がり時間 $50 \mu\text{s}$ に設定して測定した結果である。

2 段パルス電流を用いた結果、パルス励起の特徴である Ramsey フリンジが観測でき、連続励起と比べ共鳴幅が低減された。これは 1 段電流パルスと比べ、立ち上がり時間の短縮により、1 次のサイドバンド以外の波長が影響する時間や吸収量が最大となるまでの時間が短縮したために観測できたと考えられる。

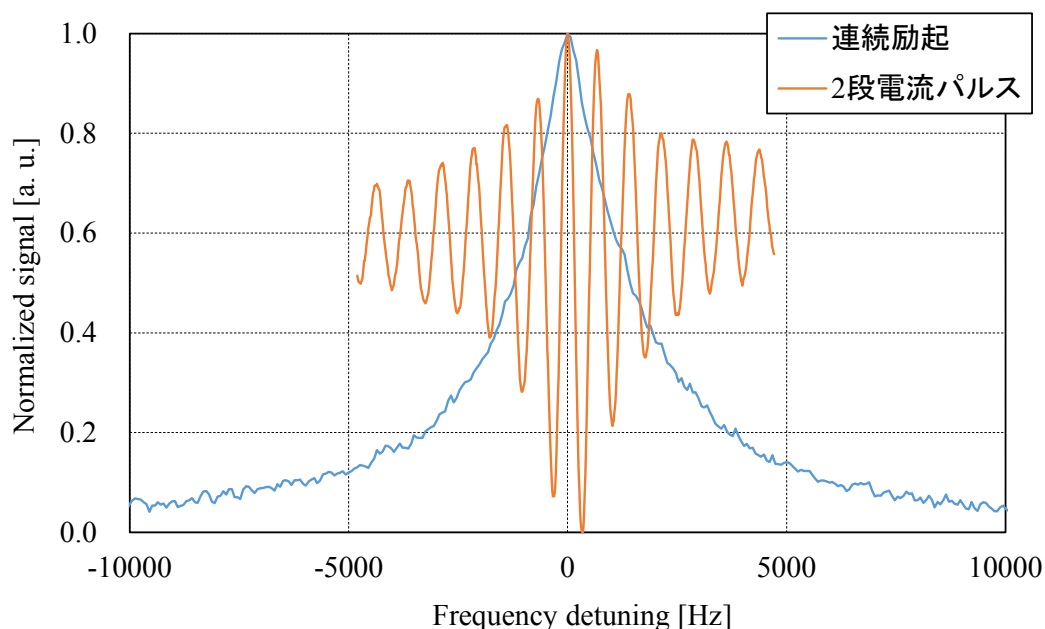


図 4.2 2 段電流パルスによる共鳴スペクトル

4.3 音響光学変調器との比較

2 段電流パルスによる駆動電流変調を用いた Ramsey-CPT 共鳴の有効性を確認するため、音響光学変調器を用いて観測した共鳴との比較を行った。通常、パルス励起では自由発展時間に対し、半値全幅とコントラストはトレードオフの関係にある。そこで、自由発展時間に対する半値全幅とコントラストを測定し、性能指数による比較を行った。

実験条件として、駆動電流変調は立ち上がり時間 $50 \mu\text{s}$ と $100 \mu\text{s}$ の 2 つの場合で、電流パルス ON 時間を $5000 \mu\text{s}$ に設定し、電流パルス OFF 時間を変化させて測定を行った。一方、音響光学変調器は、観測タイミングを $5 \mu\text{s}$ 、励起継続時間を $5000 \mu\text{s}$ に設定し、自由発展時間を変化させて測定を行った。

4.3.1 半値全幅と共鳴スペクトル

半値全幅の自由発展時間に対する特性を図 4.3 に示す。同図は駆動電流変調の自由発展時間を電流 OFF 時間と仮定しプロットしている。自由発展時間が短いほど、音響光学変調器のずれが大きくなり、 $T=200 \mu\text{s}$ の半値全幅を比較すると、立ち上がり時間 $100 \mu\text{s}$ の駆動電流変調と音響光学変調器では 200 Hz 以上の差が出ている。

図 4.4 は駆動電流変調の自由発展時間を電流 OFF 時間 T_{OFF} と立ち上がり時間 T_{rise} を合計した時間と仮定しプロットしたものである。電流 OFF 時間のみを自由発展時間とした場合に比べ、2 つの駆動電流変調の半値全幅特性だけでなく、音響光学変調器の結果とも非常によく一致している。この結果から、駆動電流変調の自由発展時間は電流 OFF 時間と立ち上がり時間を合計した時間であることが分かった。これ以降、音響光学変調器の自由発展時間は電流 OFF 時間と

立ち上がり時間の合計時間として論述する。

図 4.5 に駆動電流変調および音響光学変調器を用いた Ramsey-CPT 共鳴のスペクトルを示す。音響光学変調器は自由発展時間 $200\ \mu\text{s}$ （立ち上がり時間 $100\ \mu\text{s}$ + 電流 OFF 時間 $100\ \mu\text{s}$ ）に設定したときの共鳴であり、音響光学変調器は自由発展時間 $200\ \mu\text{s}$ に設定したときの共鳴である。図の縦軸は各共鳴の振幅で規格化した透過光強度を示し、横軸は共鳴周波数からの周波数離調を表している。左右にわずかな違いが現れたものの、Ramsey-CPT 共鳴で重要となる中央フリンジは非常に良く一致している。

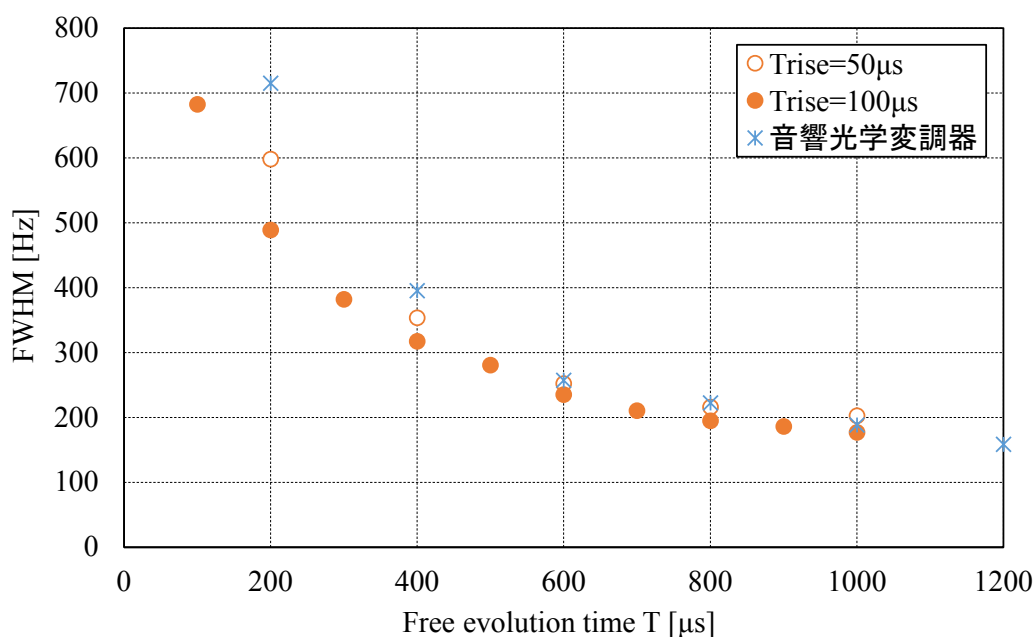


図 4.3 自由発展時間＝電流パルス OFF 時間における半値全幅特性

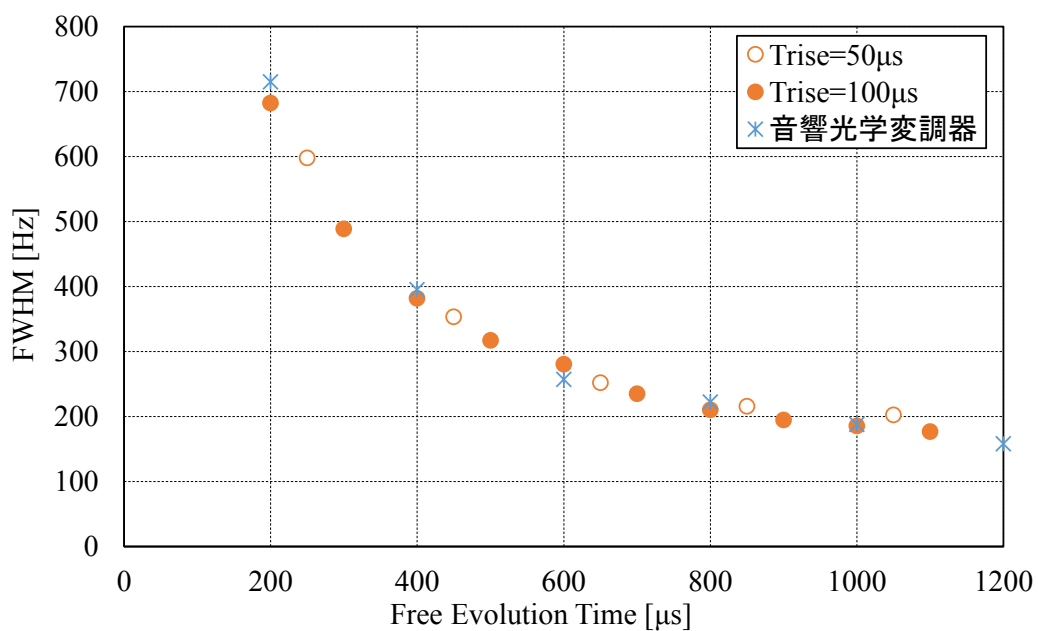


図 4.4 自由発展時間＝電流パルス OFF 時間 + 立ち上がり時間における半値全幅特性

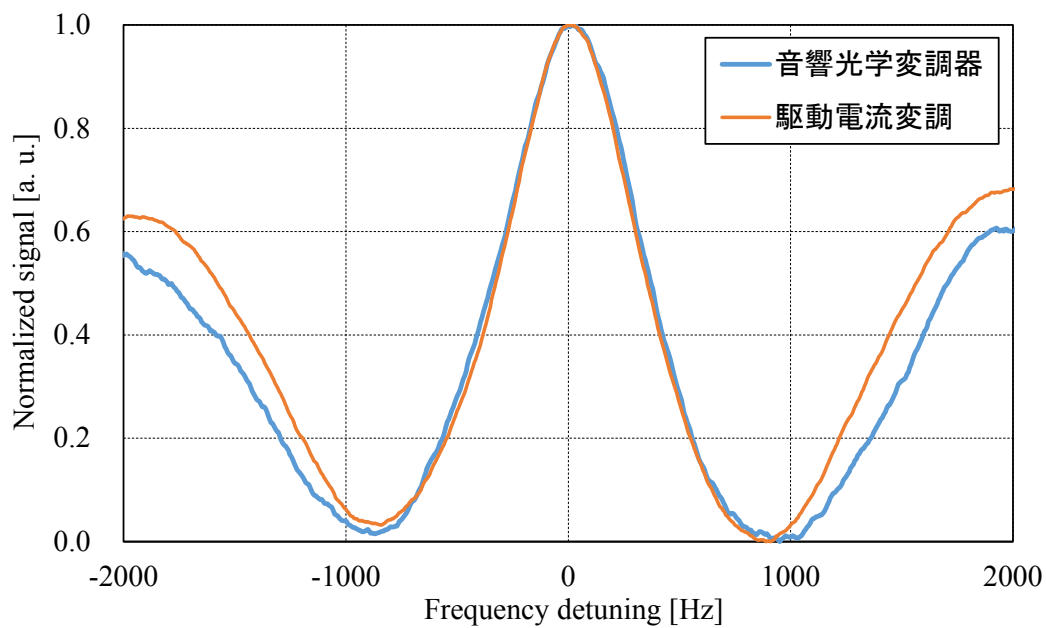


図 4.5 共鳴スペクトル比較

4.3.2 コントラスト

Ramsey-CPT 共鳴のコントラストは CPT 共鳴のコントラストと DC level の取り方が異なる。図 4.6 に各共鳴の DC level を示す。DC level は CPT 共鳴の場合最小値を基準にしているのに対し、Ramsey-CPT 共鳴の場合中心値を基準にしている。これは Ramsey 干渉によりレーザ光の吸収が生じ、最小値が DC level を下回るためである。

図 4.7 に自由発展時間に対するコントラストの特性を示す。駆動電流変調と音響光学変調器はどちらも自由発展時間 T の増加に伴いコントラストが減少している。さらに駆動電流変調において、 $T_{\text{rise}}=100 \mu\text{s}$ のコントラストは $T_{\text{rise}}=50 \mu\text{s}$ の結果と比べ全体的に下回る結果となった。

これは立ち上がり時間 T_{rise} の増加により、観測に使用しないサイドバンドが影響する時間や吸収線の最小値に到達するまでの時間が増加したためであると考えられる。透過光に吸収線が観測されてから立ち上がり時間までの時間を T_{abs} とすると、 $T_{\text{rise}}=50 \mu\text{s}$ のときは $T_{\text{abs}}=10.1 \mu\text{s}$ であるのに対し、 $T_{\text{rise}}=100 \mu\text{s}$ のときは $T_{\text{abs}}=29 \mu\text{s}$ であった (図 4.8, 図 4.9)。最初の吸収線から観測までの時間 T_{abs} が観測タイミングと同等の影響を与え、 T_{abs} が長いほど Ramsey フリンジが崩壊しコントラストが低下すると推測される。立ち上がり時間 T_{rise} の増加に伴い T_{abs} が増加することから、 T_{rise} は可能な限り短い方が良い。

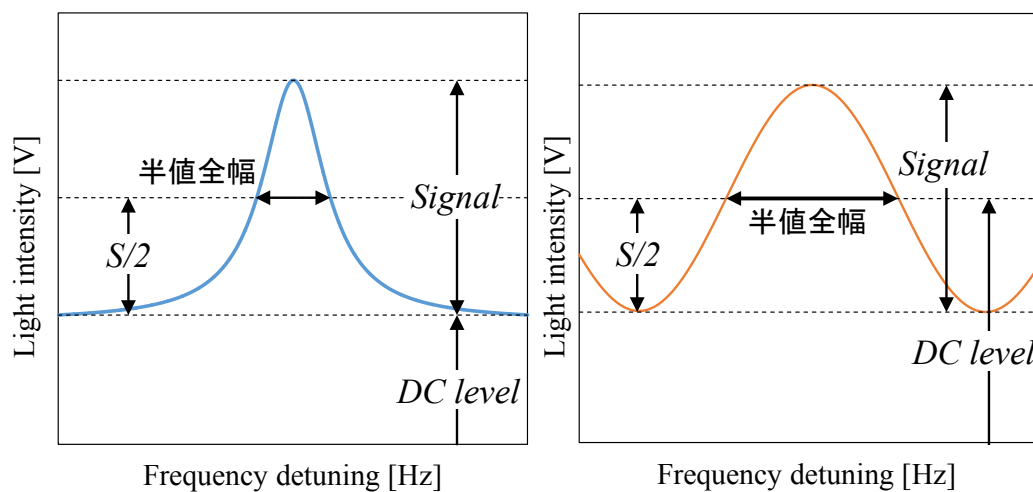


図 4.6 CPT 共鳴（左）と Ramsey-CPT 共鳴（右）の DC level の違い

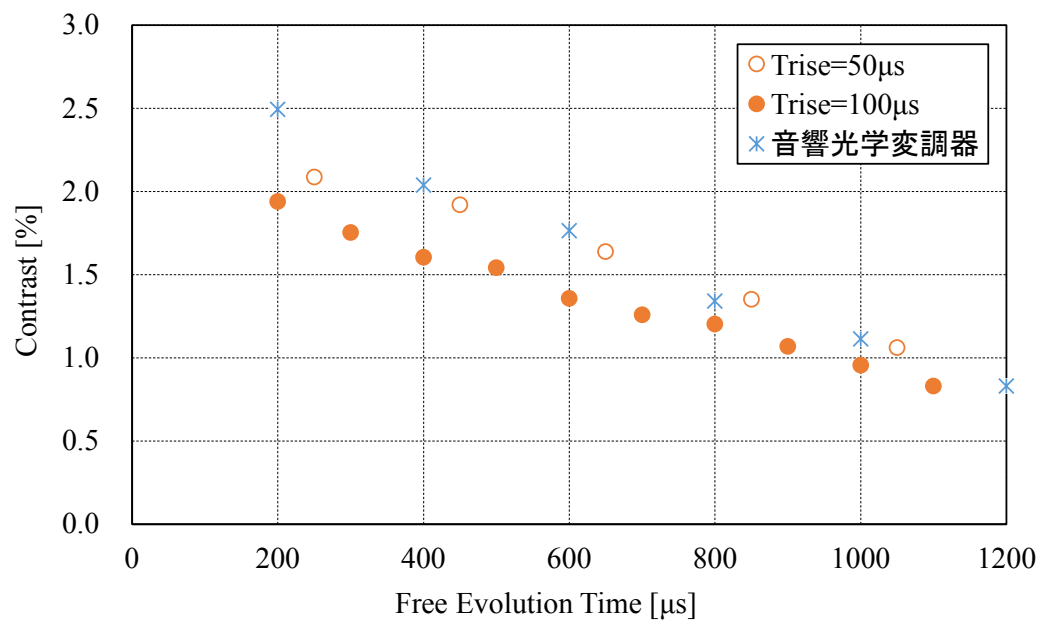


図 4.7 自由発展時間に対するコントラスト特性

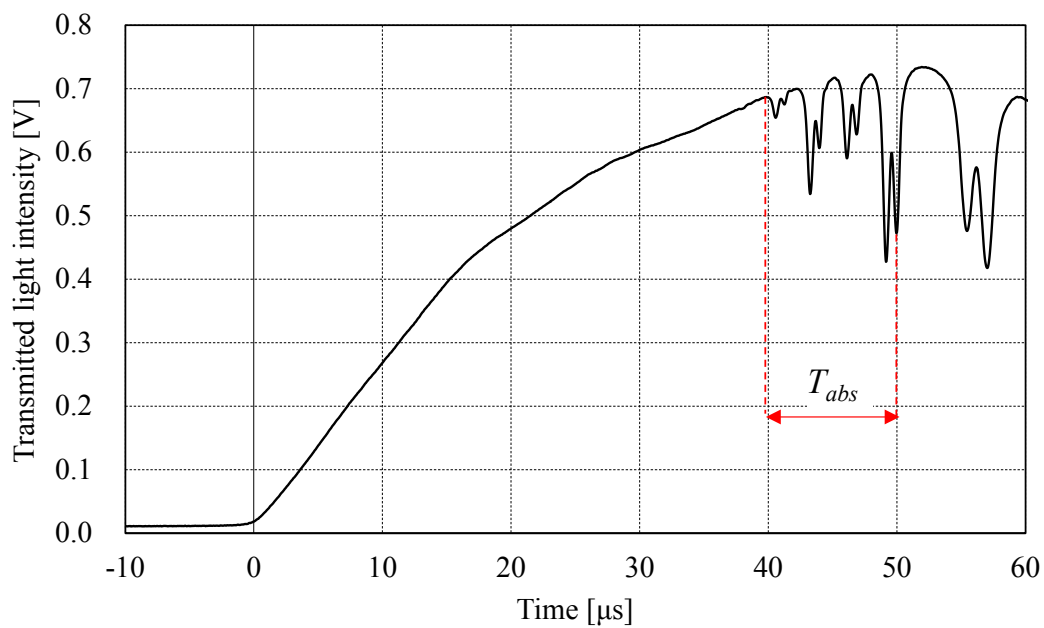


図 4.8 観測までに吸収線が影響する時間 ($T_{rise}=50 \mu s$)

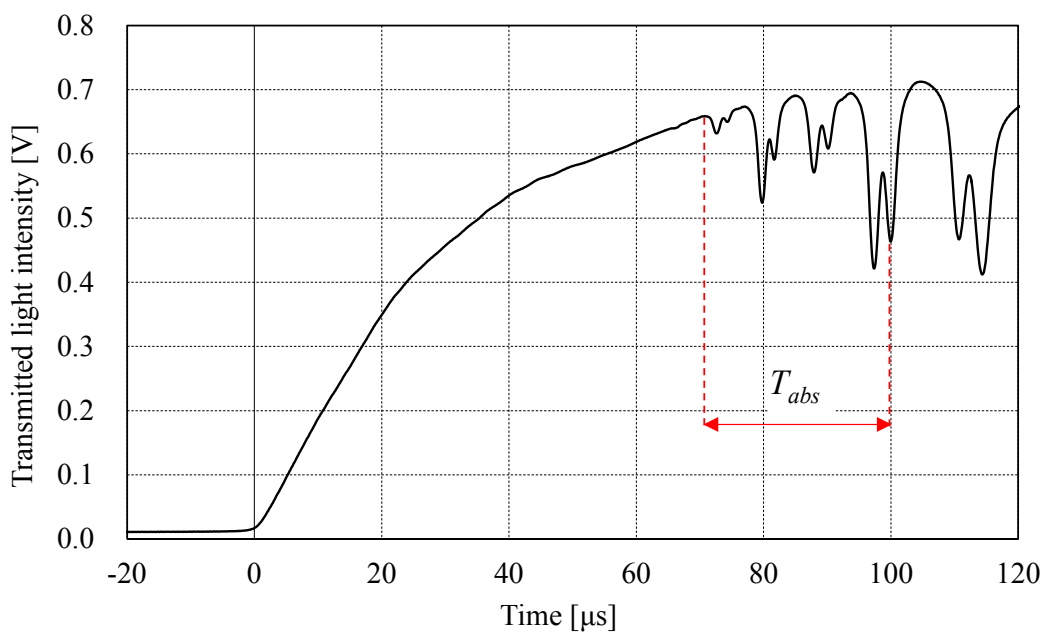


図 4.9 観測までに吸収線が影響する時間 ($T_{rise}=100 \mu s$)

4.3.3 性能指数

図 4.10 に自由発展時間に対する性能指数の特性を示す。縦軸は各共鳴の性能指数を、連続励起の半値全幅 3315 Hz とコントラスト 3.01 % から算出した性能指数を 1 として規格化したものである。

実験結果より、駆動電流変調は連続励起に対し最大約 7.16 倍の短期安定度改善効果があることが明らかとなった。また、音響光学変調器と $T_{\text{rise}}=50 \mu\text{s}$ の駆動電流変調では、性能指数が最大となる自由発展時間が $600 \mu\text{s}$ 付近であるのに対し、 $T_{\text{rise}}=100 \mu\text{s}$ の駆動電流変調では $800 \mu\text{s}$ であり、立ち上がり時間の違いにより異なる結果を示した。さらにコントラスト同様、 $T_{\text{rise}}=100 \mu\text{s}$ の性能指数は $T_{\text{rise}}=50 \mu\text{s}$ の性能指数に対し、全体的に下回っている。

各手法における最大規格化性能指数を表 4.1 に示す。駆動電流変調の最大規格化性能指数が 7.16 なのに対し、音響光学変調器は 7.55 であり、その差は約 5.2% 以下であった。性能指数で比較すると駆動電流変調は音響光学変調器と同等の改善効果を示す結果となった。

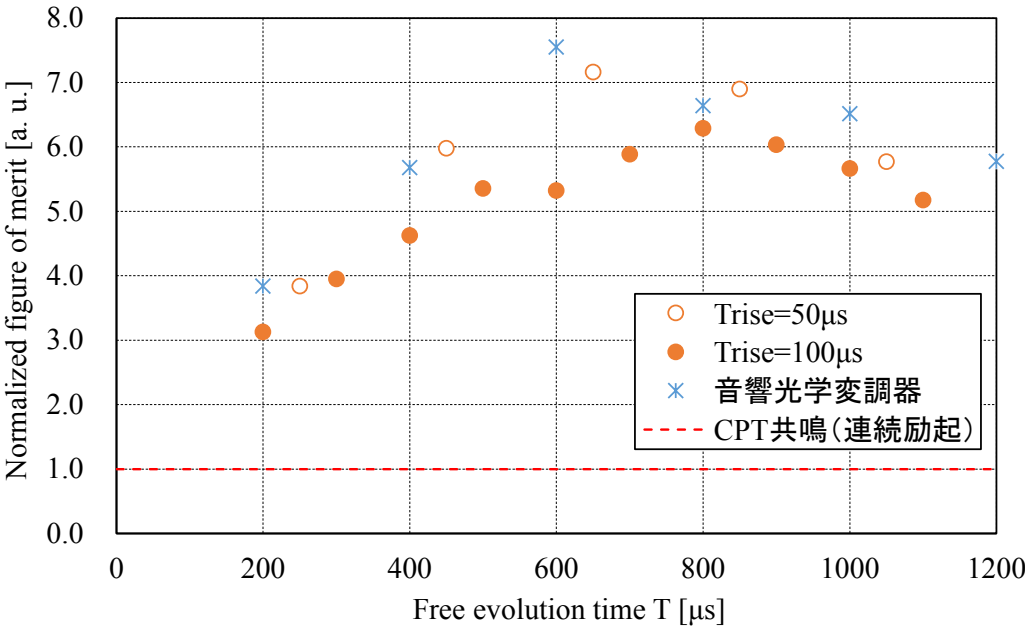


図 4.10 自由発展時間に対する規格化性能指数特性

表 4.1 最大規格化性能指数

パルス化手法		自由発展時間T		最大規格化性能指数	AOMとの差	
音響光学変調器 (AOM)		600	μs	7.55		
駆動電流変調	Trise = 50 μs	650	μs	7.16	5.17	%
	Trise = 100 μs	800	μs	6.29	16.69	%

第5章 結論

5.1 研究成果

本研究では、小型原子発振器の周波数安定度改善を目的とし、小型で低電力動作可能なパルス励起法として駆動電流変調によるレーザパルス化の検討を行った。その成果を以下に示す。

- ・ 2 段電流パルスを用いた駆動電流変調により、Ramsey-CPT 共鳴が観測可能であること示した。
- ・ 駆動電流変調における波長の立ち上がり時間は自由発展時間に含まれることが明らかとなった。
- ・ 半値全幅とコントラストの自由発展時間に対する特性は音響光学変調器を用いた結果とほぼ一致した。
- ・ 性能指数は従来の連続励起と比較すると最大約 7.16 倍の短期安定度改善効果があることを示した。
- ・ 駆動電流変調の最大規格化性能指数が 7.16 なのに対し、音響光学変調器は 7.55 であり、その差は約 5.2%以下とわずかなものであった。

以上の結果より、本提案手法は音響光学変調器と同等の短期安定度改善効果があることが明らかとなった。

5.2 今後の展望

本論文では、駆動電流変調を用いた Ramsey-CPT 共鳴の短期安定度に寄与するパラメータについて評価した。しかし、発振器としての性能を評価するためには、長期安定度の評価も行わなければならない。そのため、長期安定度の制限要因であるライトシフトの特性を調べる必要がある。

参考文献

- [1] E. Arimondo, “Coherent Population Trapping in Laser Spectroscopy”, *Progress in optics*, vol. 35, pp. 257-354, 1996.
- [2] J. Kitching, S. Knappe, N. Vukicevic, L. Hollberg, R. Wynands, and W. Weidmann, “A Microwave Frequency Reference Based on VCSEL-Driven Dark Line Resonances in Cs Vapor”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 49, no. 6, pp. 1313-1317, Dec. 2000.
- [3] M. Kahanov, I. Ben-Aroya, and G. Eisenstein, “An Atomic Clock Based on a VCSEL-Driven CPT Resonance And a small 87Rb Vapor Cell”, *Quantum Electronics and laser Science Conference, 2007. QELS’07. IEEE*, 2007.
- [4] S. Knappe, “MEMS Atomic Clocks”, Chap. 3.18 in *Comprehensive Microsystems*, Y. Gianchandani, O. Tabata, and H. Zappe (Eds.), pp. 571-612. Amsterdam: Elsevier, 2008.
- [5] 五箇 繁善, "チップスケール原子時計の最新の展望～正確な時計により広がるアプリケーション～", *電気学会誌*, Vol.135(2015), No.10.
- [6] D. W. Allan, “Statistics of atomic frequency standards,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 54, no. 2, pp. 221–230, 1966.
- [7] F. L. Walls and D. W. Allan, “Measurements of frequency stability,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 74, no. 1, pp. 162–168, 1986.
- [8] D. A. Howe, “The total deviation approach to long-term characterization of frequency stability,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics*

- and Frequency Control, vol. 47, no. 5, pp. 1102–1110, 2000.
- [9] 梶田雅稔, 小山泰弘, and 細川瑞彦, “時間周波数標準の計測と評価の基礎
時空標準特集-日本標準時の高度化,” 情報通信研究機構季報, vol. 56, no. 3,
pp. 3-15, 2010.
- [10] J. Vanier and C. Audoin, The quantum physics of atomic frequency
standards. Hilger Bristol, 1989, vol. 1.
- [11] R. Lutwak, D. Emmons, T. English, and W. Riley, “The chip-scale
atomic clock recent development progress,” in Proceedings of 35nd Annu.
Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, 2004.
- [12] S. Knappe, R. Wynands, J. Kitching, H. G. Robinson, and L. Hollberg,
“Characterization of coherent population-trapping resonances as atomic
frequency references,” Journal of the Optical Society of America B, vol. 18,
no. 11, pp. 1545–1553, 2001.
- [13] T. Zanon, S. Gu´erandel, E. De Clercq, D. Holleville, N. Dimarcq, and
A. Clairon, “High contrast ramsey fringes with coherent-population-
trapping pulses in a double lambda atomic system,” Physical Review
Letters, vol. 94, no. 19, p.193002, 2005.
- [14] N. Castagna, R. Boudot, S. Gu´erandel, E. Clercq, N. Dimarcq, and C.
Clairon, “Investigations on continuous and pulsed interrogation for a CPT
atomic clock,” IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and
Frequency Control, vol. 56, no. 2, pp. 246–253, 2009.
- [15] C. Xi, Y. Guo-Qing, W. Jin, and Z. Ming-Sheng, “Coherent population
trapping ramsey interference in cold atoms,” Chinese Physics Letters, vol.
27, no. 11, p.113201, 2010.
- [16] I. Yoshida, N. Hayashi, K. Fujita, S. Taniguchi, Y. Hoshina, and M.

- Mitsunaga, “Line-shape comparison of electromagnetically induced transparency and raman ramsey fringes in sodium vapor,” *Physical Review A*, vol. 87, no. 2, p. 023836, 2013.
- [17] F.-X. Esnault, E. Blanshan, E. Ivanov, R. Scholten, J. Kitching, and E. Donley, “Cold-atom double- λ coherent population trapping clock,” *Physical Review A*, vol. 88, no. 4, p. 042120, 2013.
- [18] N. Castagna, R. Boudot, S. Gu´erandel, E. Clercq, N. Dimarcq, and C. Clairon, “Investigations on continuous and pulsed interrogation for a CPT atomic clock,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 56, no. 2, pp. 246–253, 2009.
- [19] 「電子部品 原子時計：手のひらに載る原子時計が製品化、複雑な構造とシンプルな回路構成が融合 - EE Times Japan」 <<http://eetimes.jp/ee/articles/1102/08/news117.html>> (2016/01/21 アクセス)
- [20] Ch. Andreeva, G. Bevilacqua, V. Biancalana, S. Cartaleva, Y. Dancheva, T. Karaulanov, C. Marinelli, E. Mariotti, and L. Moi, “Two-color coherent population trapping in a single Cs hyperfine transition, with application in magnetometry”, *Appl. Phys. B* 76, pp. 667-675, 2003.
- [21] M. Arditi, and T. R. Carver, “Pressure, Light, and Temperature Shifts in Optical Detection of 0-0 Hyperfine Resonance of Alkali Metals”, *Physical Review*, vol. 124, no. 3, pp. 800-809, Nov. 1961.
- [22] A. Nagel, S. Brandt, D. Meschede, and R. Wynands, “Light shift of coherent population trapping resonances,” *Europhysics Letters*, vol. 48, no. 4, p. 385, 1999.
- [23] V. Gerginov, S. Knappe, V. Shah, P. D. Schwindt, L. Hollberg, and J.

- Kitching, “Long-term frequency instability of atomic frequency references based on coherent population trapping and microfabricated vapor cells,” *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 23, no. 4, pp. 593–597, 2006.
- [24] O. Kozlova, J.-M. Danet, S. Gu´erandel, and E. de Clercq, “Limitations of longterm stability in a coherent population trapping Cs clock,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 7, pp. 1863–1870, 2014.
- [25] M. Pellaton, C. Affolderbach, Y. Petremand, N. de Rooig, and G. Miletì, “Study of laser-pumped double-resonance clock signals using a microfabricated cell”, *Phys. Scr.*, T149, p. 014013, 2012.
- [26] S. Gu´erandel, T. Zanon, N. Castagna, F. Dahes, E. de Clercq, N. Dimarcq, and C. Clairon, “Raman–ramsey interaction for coherent population trapping cs clock,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, no. 2, pp. 383–387, 2007.
- [27] D. A. Steck, “Alkali D line data,” 2012. [Online]. Available: <http://steck.us/alkalidata>

付録 FPGA プログラム

図 A に FPGA プログラムのブロック図を示す。

① PLL

制御の基準となる内部クロックを生成するプログラム。DE0 の標準クロック信号 (50MHz) を 100MHz に逡倍する。プログラム上は 100MHz よりも高周波に設定できるが、高く設定し過ぎるとプログラム通りに動かなくなる。おそらく高周波にすることでクロック信号の振幅が低下し、DE0 の内部回路がクロック信号を読み取れなくなるためだと考えられる。

② 分周

① で生成した内部クロックから周波数の異なるクロック信号を生成するプログラム。DE0 と接続する外部 IC (DAC や ADC) によってクロック周波数が異なるため、内部クロックを分周し用途に合わせたクロック信号を生成する。

③ LCD

液晶ディスプレイ (LCD) に設定を表示させるためのプログラム。プログラム上の数字はそのまま表示できないので、設定したパラメータや表示させたい文字は文字コードを使って LCD 上に表示できるように変換する必要がある。また、LCD の表示スペースは限られているため、スイッチで表示を切り替えられるようにしている。

④ サンプルホールド回路用信号

Ramsey-CPT 共鳴の観測に必要なサンプルホールド回路の参照信号 (3.6.2 節参照) を生成するプログラム。レーザの立ち上がりから参照信号を ON に切り替えるまでの時間と、参照信号を ON にする時間を調整できる。

⑤ DA コンバータ用信号

12bit・シリアルデータ入力の DAC8043 を動かすためのプログラム。データ入力時以外 DAC に入力するクロックをカットし、DE0 から DAC に伝わるノイズを軽減している。

⑥ ボタンとスイッチ

DE0 に搭載されているボタンとスイッチを認識させるためのプログラム。スイッチを切り替えることで各パラメータを同じボタンで調整可能にした。

⑦ 各パラメータの値の設定

ボタン操作で各パラメータの値を変更・記憶するためのプログラム。BUTTON[0]でカウントアップ、BUTTON[1]で桁切り替え、BUTTON[2]で設定した値を出力できる。また、設定した値を LCD に表示させるための変換もここで行っている。

⑧ 立ち上がり時間制御用サンプルホールド信号

立ち上がり時間を制御するのに必要なサンプルホールド回路 (3.6.3 節参照) の参照信号を生成するためのプログラム。④で生成する参照信号とは異なり、1 周期ごとに異なるタイミングを出力する参照信号を生成する。また、

ロックイン回路用のリファレンス信号も生成している。

⑨ AD コンバータ用信号

10bit の AD コンバータ MCP3002 を動かすためのプログラム。AD コンバータが読み取った入力電圧を 10 進数と電圧値の両方で確認できるように変換している。

⑩ 立ち上がり時間制御

立ち上がり時間を制御するためのプログラム。⑨で読み取った電圧値から立ち上がり時間のずれを検出し、2 段電流パルスにおける 1 段目電流の入力時間を制御する。制御機能の ON/OFF はスイッチで切り替えることができ、DE0 に搭載されている 4 つの 7 セグメント LED が「Co.0」のときは OFF、「Co.1」のときは ON である。

⑪ VCSEL の変調用 PLL 分周

PLL 回路 EVAL-ADF4158EB1Z の信号を分周するためのプログラム。PLL 回路を用いて VCSEL の変調を行う際、PLL の掃引周波数に対応するリファレンス信号がないため、掃引周波数と同じ周波数の矩形波を生成している。

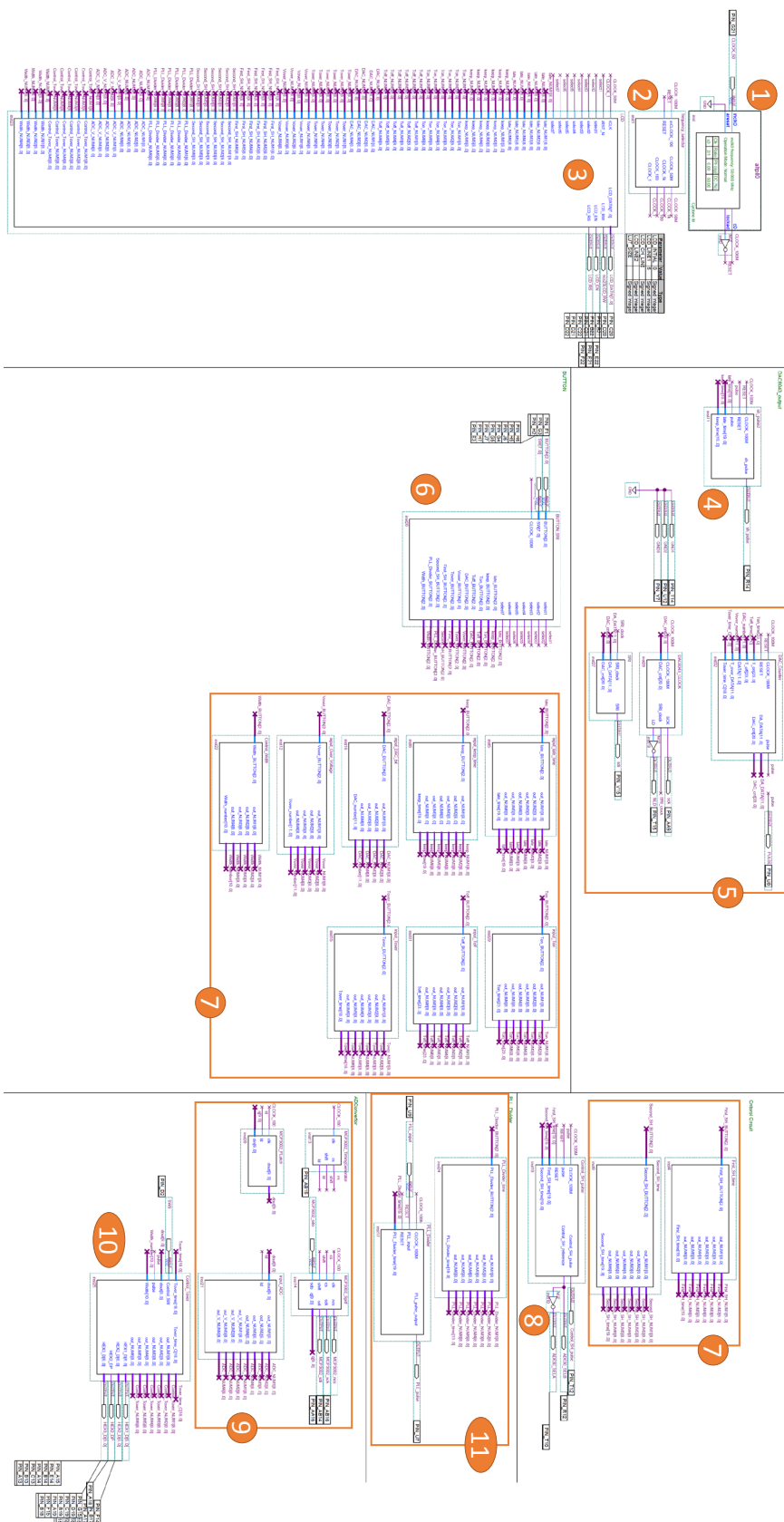


図 A FPGA プログラムのブロック図

業績

国内学会・口頭発表・査読なし

井出拓美, 五箇繁善, "CSAC に適した VCSEL の直接変調による CPT パルス励起", 光領域および精密周波数発生 of 回路技術調査委員会, 千歳アルカディア・プラザ NDK 千歳テクニカルセンター 3 階会議室, 2014 年 9 月

国際学会・ポスター発表・査読あり

Takumi Ide, Shigeyoshi Goka, Yuichiro Yano, "CPT pulse excitation method based on VCSEL current modulation for miniature atomic clocks", 2015 JOINT CONFERENCE OF THE IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM & EUROPEAN FREQUENCY AND TIME FORUM, Denver, Colorado, USA, 2015 年 4 月

謝辞

本研究を遂行するにあたり、様々なご指導を頂きました首都大学東京大学院
理工学研究科 電気電子専攻准教授 五箇繁善先生に心より御礼申し上げます。

また、日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた矢野雄一郎先輩をはじめとする精密周波数発生・応用研究室の皆様、この場を借りて感謝の意を表明
させて頂きたいと思います。